



# GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

Gemelo digital de una máquina para conformar, llenar  
y precintar embalajes

Autor: Antonio Moreno-Ortiz García

Director: José Antonio Rodríguez Mondéjar

Madrid

Julio de 2025

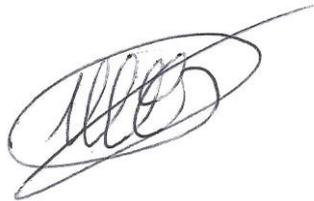


Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título  
Gemelo digital de una máquina para conformar, llenar y precintar embalajes  
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el  
curso académico 2024/25 es de mi autoría, original e inédito y  
no ha 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.: Antonio Moreno-Ortiz García.

Fecha: 19/07/25



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: José Antonio Rodríguez Mondéjar

Fecha: ...../ ...../ .....





# GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

Gemelo digital de una máquina para conformar, llenar  
y precintar embalajes

Autor: Antonio Moreno-Ortiz García

Director: José Antonio Rodríguez Mondéjar

Madrid



# **Agradecimientos**

A mi familia y amigos, por todo su apoyo durante la carrera, en especial durante este proyecto.

Al profesorado y a la institución ICAI, por su guía y formación durante los últimos 4 años y su dedicación a una enseñanza de calidad, incluso en los difíciles tiempos de la pandemia.



# Gemelo digital de una máquina para conformar, llenar y precintar embalajes

**Autor: Moreno-Ortiz García, Antonio.**

Director: Rodríguez Mondéjar, José Antonio.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

## RESUMEN DEL PROYECTO

Este proyecto presenta el desarrollo de un gemelo digital de nivel 1 para una línea de embalaje. El gemelo permite simular el comportamiento de la línea, facilitando la detección de errores, la optimización del diseño y la validación de la lógica de control.

**Palabras clave:** Gemelo digital, Industria 4.0, Siemens NX, PLC, embalaje, automatización

### 1. Introducción

En el contexto de la industria 4.0, las tecnologías de digitalización y tratamiento de datos están cobrando una gran importancia para empresas y gobiernos del mundo (Gobierno de España, 2025).

A pesar de ser una tecnología que lleva existiendo desde la carrera a la luna en el siglo pasado (Allen, 2021), el gemelo digital está comenzando a cobrar más y más relevancia en la industria actual, gracias a la mayor disponibilidad de sensores y actuadores con capacidades IOT (Ellithy, 2024).

Esta tecnología permite planificar, monitorizar e incluso prever el comportamiento futuro de su contraparte física, convirtiéndola en una muy potente herramienta. (Eulaerts, Grabowska, & Bergamini, 2024)

### 2. Definición del proyecto

En este proyecto, se desarrollará un gemelo digital de nivel de integración 1 de una línea para conformar, llenar y precintar embalajes. El nivel de integración 1 implica que, de momento, el gemelo digital será muy similar a una simulación, sin poder realimentarse de su contraparte física. (Subramanyan, 2024)

Sin embargo, como esta contraparte no existe aún, se usará el gemelo para avanzar con la programación y detectar errores o posibles mejoras en el diseño.

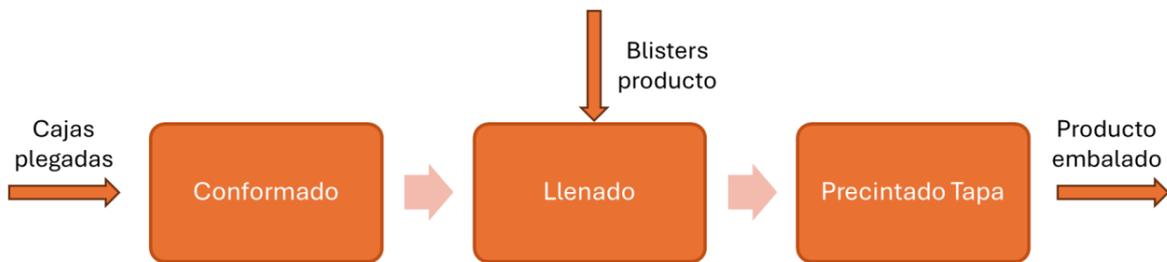
Se estudiará también cómo de accesible es la tecnología de gemelo digital, para comprobar si se alinea con la visión de gobiernos europeos para el futuro de la digitalización. (Gobierno de España, 2025) (Eulaerts, Grabowska, & Bergamini, 2024)

### 3. Descripción del modelo/sistema/herramienta

Para crear el gemelo digital, se empleará software de Siemens. En concreto se empleará NX CAD, NX MCD, TIA Portal y PLCSIM Advanced. El uso de software de un mismo

proveedor facilita las comunicaciones entre los distintos componentes del gemelo. Concretamente, entre el entorno digital definido en NX MCD y el controlador externo programado en TIA Portal y simulado en PLCSIM Advanced.

Para facilitar el diseño y posterior depuración, se ha dividido la línea en tres subestaciones, como se puede observar en la *Ilustración 1*.

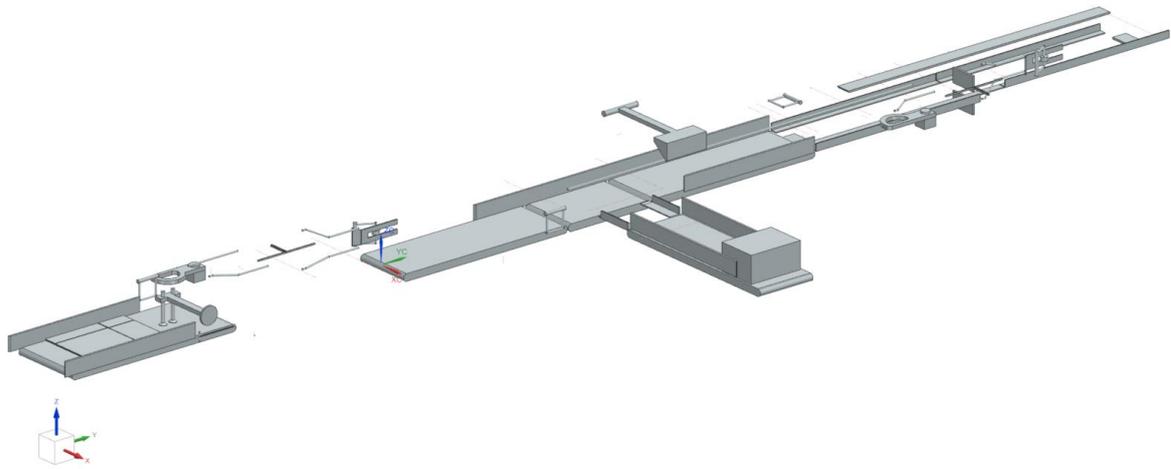


*Ilustración 1 - Esquema del sistema dividido en subestaciones*

Como se puede observar, la fase de conformado tomará las cajas plegadas de un proceso de alimentación externo, para conformarlas en su forma final y sellar su base. La posterior fase de llenado insertará las bandejas de producto genérico en el interior de la caja. Por último, la fase de precintado de tapa sellará la caja por completo, permitiendo su retirada por un proceso externo.

#### **4. Resultados**

Se consigue realizar el gemelo digital de la línea de embalaje diseñada, como se observa en la *ilustración 2*.



*Ilustración 2 – Vista trimétrica del gemelo digital en posición inicial*

No obstante, se observa que el poder de procesamiento requerido para poder ejecutar el gemelo en tiempo real es muy elevado. Se llega en algunos casos a requerir 4 segundos en tiempo real para simular 1 sólo en el entorno digital.

A pesar de esto, se demuestra que las herramientas para la creación de gemelos digitales son relativamente accesibles, permitiendo crear un gemelo funcional con solamente los recursos encontrados en la web y aportados por los proveedores.

## **5. Conclusiones**

El proyecto ha demostrado que es posible desarrollar un gemelo digital funcional de una línea de embalaje sin necesidad de conocimientos avanzados en programación.

Se ha logrado modelar con éxito cada una de las estaciones del proceso (conformado, llenado y sellado), integrando sensores, actuadores y lógica de control mediante un PLC virtual.

El sistema permite simular el comportamiento físico de la línea, facilitando la validación del diseño y la detección de errores antes de su implementación real.

No obstante, se han identificado áreas de mejora, como la optimización de recursos computacionales y la necesidad de ajustar ciertos parámetros para evitar errores derivados de la simulación.

## **6. Referencias**

- [1] Allen, B. D. (2021). Digital Twins and Living models at NASA. *Digital Twin Summit*. Videoconferencia. Recuperado el 17 de septiembre de 2024, de <https://ntrs.nasa.gov/citations/20210023699>

- [2] Ellithy, K. (2024). AGV and Industry 4.0 in warehouses: a comprehensive analysis of existing literature and an innovative framework for flexible automation. *Int J Adv Manuf Technol* 134, 15-38.
- [3] Eulaerts, O., Grabowska, M., & Bergamini, M. (2024). *Weak signals in science and technologies 2024*. Obtenido de Publications office of the European Union el 10 de julio de 2025: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/4cff5301-ece2-11ef-b5e9-01aa75ed71a1/language-en>
- [4] Gobierno de España. (2025). *¿Qué es un gemelo digital y cuál es su impacto en la transformación digital de España?* Obtenido de Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia el 30 de junio de 2025 : <https://planderecuperacion.gob.es/noticias/que-es-un-gemelo-digital-y-su-impacto-en-la-transformacion-digital-de-espana-prtr>

# Digital Twin of a Machine for Forming, Filling, and Sealing Packaging

**Author: Moreno-Ortiz García, Antonio.**

Supervisor: Rodríguez Mondéjar, José Antonio.

Collaborating entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

## PROJECT ABSTRACT

This project presents the development of a Level-1 digital twin for a packaging line. The digital twin enables simulation of the line's behavior, facilitating error detection, design optimization, and validation of control logic.

**Keywords:** Digital twin, Industry 4.0, Siemens NX, PLC, packaging, automation

### 1. Introduction

In the context of Industry 4.0, digitalization and data-processing technologies are gaining significant importance for companies and governments worldwide (Government of Spain, 2025).

Although the concept has existed since the Moon race, last century (Allen, 2021), digital twins are beginning to gain increasing relevance in today's industry, thanks to the greater availability of sensors and actuators with IoT capabilities (Ellithy, 2024).

This technology enables planning, monitoring, and even predicting the future behavior of its physical counterpart, making it a powerful tool (Eulaerts, Grabowska, & Bergamini, 2024).

### 2. Project Definition

In this project, a Level-1 integration digital twin will be developed, specifically for a packaging line for forming, filling, and sealing boxes. Level-1 integration implies that, for now, the digital twin will function much like a simulation, without receiving live feedback from its physical counterpart (Subramanyan, 2024).

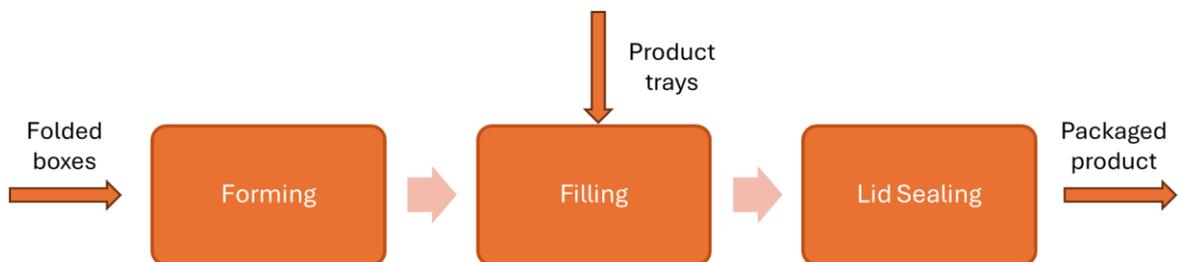
However, since the physical counterpart does not yet exist, the digital twin will be used to advance programming tasks and to identify errors or potential design improvements.

The accessibility of digital twin technology will also be evaluated, in order to determine its alignment with the vision of European governments for the future of digitalization (Government of Spain, 2025); (Eulaerts, Grabowska, & Bergamini, 2024).

### 3. Model/System/Tool Description

To create the digital twin, Siemens software will be employed. Specifically, NX CAD, NX MCD, TIA Portal, and PLCSIM Advanced. Utilizing software from a single provider facilitates communication among the various components of the twin. Particularly, between the digital environment defined in NX MCD and the external controller; programmed in TIA Portal and simulated in PLCSIM Advanced.

To streamline design and subsequent debugging, the line has been divided into three substations, as illustrated in *Figure 1*.

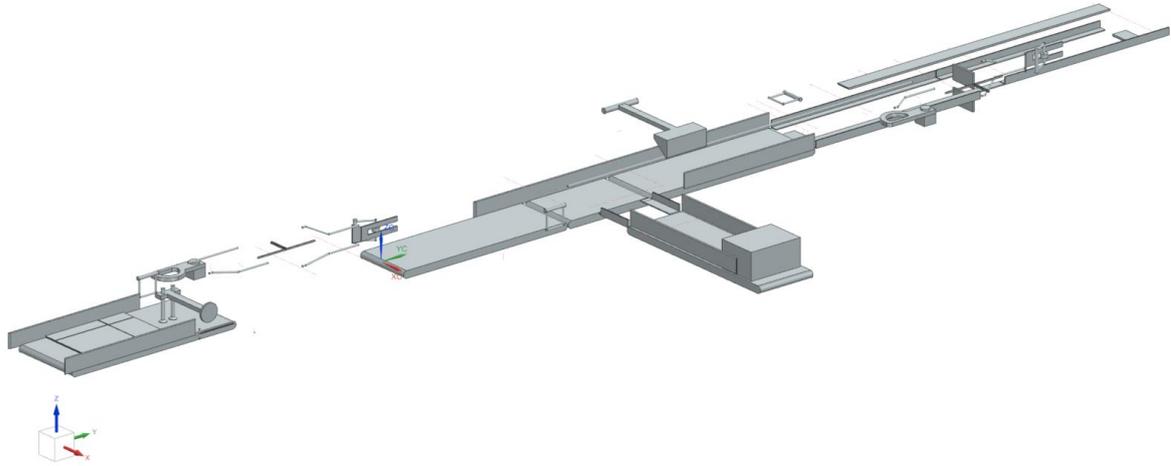


*Figure 1. System schematic, divided into substations*

As shown, the forming phase will process folded boxes from an external feeding system, shaping them into their final form and sealing their base. The subsequent filling phase will insert stacked trays of a generic product into each box. Finally, the lid-sealing phase will fully seal the box, enabling its removal by an external system.

### 4. Results

In the end, the digital twin of the designed packaging line is successfully implemented, as shown in *Figure 2*.



*Figure 2. Trimetric view of the digital twin, in its initial position*

However, it was observed that the processing power required to run the twin in real time is substantial. In some cases, simulating one second of operation in the digital environment requires four seconds of real time.

Despite this limitation, the tools for creating digital twins have proven to be relatively accessible, allowing the development of a functional twin using only publicly available resources and vendor-provided materials.

## **5. Conclusions**

The project has demonstrated that it is possible to develop a functional digital twin of a packaging line without advanced programming expertise.

Each station of the process (forming, filling, and sealing) was successfully modeled, integrating sensors, actuators, and control logic via a virtual PLC.

The system enables simulation of the line's physical behavior, facilitating design validation and error detection prior to real-world implementation.

Areas for improvement were identified, including the need to optimize computational resources and adjust certain parameters to prevent simulation-induced errors.

## **6. References**

- [1] Allen, B. D. (2021). Digital Twins and Living models at NASA. *Digital Twin Summit*. Videoconference. Retrieved September 17, 2024, from <https://ntrs.nasa.gov/citations/20210023699>

- [2] Ellithy, K. (2024). AGV and Industry 4.0 in warehouses: a comprehensive analysis of existing literature and an innovative framework for flexible automation. *Int J Adv Manuf Technol* 134, 15-38.
- [3] Eulaerts, O., Grabowska, M., & Bergamini, M. (2024). *Weak signals in science and technologies 2024*. Retrieved July 10, 2025, from Publications office of the European Union: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/4cff5301-ece2-11ef-b5e9-01aa75ed71a1/language-en>
- [4] Government of Spain. (2025). *¿Qué es un gemelo digital y cuál es su impacto en la transformación digital de España?* Retrieved July 30, 2025, from Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia: <https://planderecuperacion.gob.es/noticias/que-es-un-gemelo-digital-y-su-impacto-en-la-transformacion-digital-de-espana-prtr>

## *Índice de la memoria*

<b>Capítulo 1. Introducción .....</b>	<b>9</b>
1.1 La industria 4.0.....	9
1.2 El gemelo Digital.....	11
1.3 El embalaje en la revolución digital .....	14
<b>Capítulo 2. Descripción de las Tecnologías.....</b>	<b>17</b>
2.1 Representación estática .....	17
2.2 Entorno virtual.....	18
2.3 Programación del control .....	19
2.3.1 Diagrama de contactos.....	21
2.3.2 Grafset.....	22
<b>Capítulo 3. Estado de la Cuestión .....</b>	<b>25</b>
<b>Capítulo 4. Definición del Trabajo .....</b>	<b>27</b>
4.1 Justificación.....	27
4.2 Objetivos .....	27
4.3 Metodología.....	28
4.3.1 Fases del proceso de embalaje.....	28
4.3.2 Fases del desarrollo del gemelo digital .....	29
<b>Capítulo 5. Diseño del proceso de embalaje .....</b>	<b>31</b>
5.1 Diseño conformadora .....	31
5.1.1 Cintas y barreras.....	32
5.1.2 Brazo de succión.....	32
5.1.3 Aguantador .....	33
5.1.4 Empujador solapa superior.....	34
5.1.5 Empujador solapas laterales.....	35
5.1.6 barras guía de solapas .....	36
5.1.7 Pistón guía.....	37
5.1.8 Dispensador de cinta adhesiva.....	38
5.1.9 Sensores.....	39

5.2	Diseño Llenadora .....	41
5.2.1	<i>bandejas de producto</i> .....	42
5.2.2	<i>Cintas transportadoras</i> .....	42
5.2.3	<i>Empujador solapa superior</i> .....	43
5.2.4	<i>Empujador producto</i> .....	43
5.2.5	<i>Sensores</i> .....	44
5.3	Diseño Selladora.....	45
5.3.1	<i>Empujador de alimentación</i> .....	45
5.3.2	<i>Railes y techo</i> .....	46
5.3.3	<i>Sistema de palas</i> .....	46
<b>Capítulo 6. Creación del entorno digital.....</b>		<b>49</b>
6.1	Definición cuerpos rígidos .....	49
6.2	Definición de cuerpos de colisión .....	51
6.2.1	<i>Selección de caras y aristas</i> .....	52
6.2.2	<i>Material del cuerpo de colisión</i> .....	55
6.2.3	<i>Categoría de colisión</i> .....	56
6.3	Definición de juntas y restricciones .....	56
6.3.1	<i>Juntas fijas</i> .....	56
6.3.2	<i>Juntas acharneladas</i> .....	56
6.3.3	<i>Juntas deslizantes</i> .....	57
6.3.4	<i>Juntas de punto sobre curva</i> .....	59
6.3.5	<i>Función de amortiguador de resorte</i> .....	60
6.4	Definición de actuadores .....	60
6.4.1	<i>Superficies de transporte</i> .....	61
6.4.2	<i>Controladores de velocidad</i> .....	62
6.5	Definición de sensores.....	63
6.6	Definición de zonas de interacción.....	65
6.6.1	<i>Copa de succión</i> .....	65
6.6.2	<i>Zona de unión</i> .....	66
6.7	Modelado y diseño caja.....	70
6.7.1	<i>Modelado y dimensiones</i> .....	70
6.7.2	<i>Juntas y dinamizado</i> .....	72
6.8	Agrupación de señales para comunicación externa.....	74

<b>Capítulo 7. Programación del PLC.....</b>	<b>77</b>
7.1 Filosofía de diseño del programa .....	77
7.2 Claves de bloque conformadora.....	77
7.3 Claves del bloque llenadora .....	78
7.4 Claves del bloque selladora.....	78
<b>Capítulo 8. Conclusiones y Trabajos Futuros.....</b>	<b>79</b>
8.1 Trabajos futuros.....	79
8.2 mejoras al gemelo existente .....	80
8.3 Conclusiones proyecto .....	80
<b>Capítulo 9. Bibliografía.....</b>	<b>81</b>
<b>ANEXO I: Relación con ODS.....</b>	<b>85</b>
<b>Anexo II: Capturas del proceso de embalaje en funcionamiento.....</b>	<b>87</b>
Estación conformadora .....	87
Estación de llenado .....	91
Estación de sellado de tapa .....	93
<b>Anexo III: Código de programación PLC.....</b>	<b>95</b>
Segmentos del Main.....	95
Programación bloque conformadora.....	100
Programación bloque de llenado.....	103
Programación bloque sellado.....	105

## *Índice de figuras*

Figura 1. Línea del tiempo de las revoluciones industriales (Rozo-García, 2020) .....	10
Figura 2. Tecnologías y técnicas relevantes en la industria 4.0 (Rozo-García, 2020) .....	11
Figura 3. Clasificación de gemelos digitales según su nivel de integración. (Subramanyan, 2024).....	13
Figura 4. Ejemplo de configuración de brazo robot en estación palletizadora (TMG Impianti, 2025).....	15
Figura 5. Entorno de programa de NX Modelado .....	18
Figura 6. Entorno de programa NX MCD .....	19
Figura 7. Entorno de programa PLCSIM Advanced .....	20
Figura 8. Figura entorno TIA Portal .....	21
Figura 9. Ejemplo de diagrama de contactos en TIA Portal.....	22
Figura 10. Ejemplo de grafcet sencillo para control de empujador de solapa.....	23
Figura 11. Esquema simplificado de las estaciones de la línea de embalaje.....	28
Figura 12. Vista trimétrica de modelo de estación conformadora.....	31
Figura 13. Modelo CAD de la cinta transportadora de alimentación de cajas y barreras ...	32
Figura 14. Modelo CAD del brazo de succión .....	33
Figura 15. Modelo CAD del aguantador .....	34
Figura 16. Modelo CAD de empujador de solapa superior. ....	35
Figura 17. Modelo CAD del empujador de solapas laterales .....	36
Figura 18. Vista de planta del modelo CAD de las barras guía.....	37
Figura 19. Diseño CAD de Pistón Guía de solapas cortas, con pistón extendido .....	37
Figura 20. Vista trimétrica de modelo CAD de dispensador de cinta adhesiva .....	38
Figura 21. Vista de planta de modelo CAD de dispensador de cinta adhesiva .....	39
Figura 22. Modelo CAD de sensor de fin de carrera.....	40
Figura 23. Vista trimétrica de modelo de estación de llenado .....	41
Figura 24. Diseño CAD de las bandejas de producto, resaltadas en color. ....	42

Figura 25. Modelo CAD del empujador de producto .....	44
Figura 26. Vista trímétrica del modelo CAD de la estación de sellado de tapa .....	45
Figura 27. Vista de perfil del modelo CAD de la estación de sellado de tapa .....	46
Figura 28. Vista de planta del modelo CAD de la estación de sellado de tapa .....	47
Figura 29. Ventana de selección de propiedades de sólido rígido.....	50
Figura 30. Ventana de selección de propiedades de sólido de colisión.....	51
Figura 31. Configuración de cuerpo de colisión para empujador de producto.....	53
Figura 32. Cuerpos de colisión que conforman el empujador de producto .....	54
Figura 33. Conjunto de cuerpos de colisión de barra guía de solapas.....	55
Figura 34. Opciones de propiedades para nuevos materiales de cuerpo de colisión (Siemens, s.f.).....	55
Figura 35. Junta acharnelada del empujador de solapa superior con eje de giro resaltado .	57
Figura 36. Junta deslizante de vástago de copa de succión con respecto a su base .....	58
Figura 37. Configuración de junta de tipo punto sobre curva .....	59
Figura 38. Configuración de amortiguador de resorte para el mecanismo de sellado.....	60
Figura 39. Superficie de transporte como cinta transportadora, con parámetros .....	61
Figura 40. Parámetros de controlador de velocidad de bajada para empujador de producto .....	63
Figura 41. Sensor de colisión para fin de carrera de base de brazo de succión, en posición de brazo bajado.....	64
Figura 42. Zona de agarre de copa de succión y parámetros.....	65
Figura 43. Zona de unión entre caja y producto en fase de llenado .....	67
Figura 44. Zona de unión para selladora, con activación definida por el usuario .....	68
Figura 45. Sensor de colisión para trigger de sellado.....	69
Figura 46. Adaptador de señales para el control de sellado .....	70
Figura 47. Dimensiones de la caja plegada .....	71
Figura 48. Modelo CAD de la caja con base conformada.....	72
Figura 49. Ejes de la caja y parámetros de resortes para modelar resistencia del material .	73
Figura 50. Modelo dinamizado final de la caja plegada.....	74
Figura 51. Adaptador de señales de la estación encajadora .....	75

Figura 52. Máquina de estados de plantilla PackML .....	79
Figura 53. Proceso conformadora: Estado inicial.....	87
Figura 54. Proceso conformadora: Brazo de succión eleva la caja mientras que el aguantador se introduce en la apertura .....	88
Figura 55. Proceso conformadora: Caja completamente conformada.....	88
Figura 56. Proceso conformadora: Caja avanza hasta posición de empujador, donde se doblan las solapas .....	89
Figura 57. Proceso conformadora: Pistón guía se retira tras conformarse las solapas largas .....	89
Figura 58. Proceso conformadora: Aguantador se retira tras el sellado de la base .....	90
Figura 59. Proceso llenado: Se deposita caja conformada sobre cinta de alimentación .....	91
Figura 60. Proceso llenado: Se sube la solapa superior.....	91
Figura 61. Proceso llenado: Caja se sitúa en posición y empujador desciende.....	92
Figura 62. Proceso llenado: Tras llenado, caja continua por la cinta y empujador asciende .....	92
Figura 63. Proceso de sellado: Empujador coloca la caja sobre los railes .....	93
Figura 64. Proceso de sellado: Palas empujan la caja hasta empujador de solapas .....	93
Figura 65. Proceso de sellado: Pistón guía se retrae cuando se conforman las solapas superior e inferior .....	94
Figura 66. Proceso de sellado: Se precinta la tapa .....	94
Figura 67. Segmento Main 1 .....	95
Figura 68. Segmento Main 2 .....	96
Figura 69. Segmento Main 3 .....	97
Figura 70. Segmento Main 4 .....	98
Figura 71. Segmento Main 5 .....	99
Figura 72. Grafset conformadora .....	100
Figura 73. Instrucciones posteriores conformadora 1 .....	101
Figura 74. Instrucciones posteriores conformadora 2 .....	102
Figura 75. Grafset llenado .....	103
Figura 76. Instrucciones posteriores llenado 1 .....	104

Figura 77. Grafset sellado .....	105
Figura 78. Instrucciones posteriores sellado 1.....	106
Figura 79. Instrucciones posteriores sellado 2.....	107

## *Índice de tablas*

Tabla 1. Orden y descripción de fases de desarrollo del gemelo digital ..... 29

## **Capítulo 1. INTRODUCCIÓN**

En este capítulo se explicará de forma resumida el paradigma actual sobre cuestiones de digitalización y automatización, concretando en su relevancia e implicaciones en procesos de embalaje. No se hará especial hincapié en aspectos técnicos en la introducción (explicándose éstos en el *capítulo 2*) sino que se buscará exponer porqué el proyecto es beneficioso.

### ***1.1 LA INDUSTRIA 4.0***

El objeto de este trabajo, el gemelo digital, es una herramienta considerada por gobiernos y empresas como fundamental para la transformación tecnológica de la industria; mejorando la eficiencia, competitividad e innovación (Gobierno de España, 2025). Sin embargo, antes de dar una definición en el *apartado 1.2*, es importante conocer el contexto que ha permitido su aumento de relevancia en el sector industrial, entre muchos otros. (Amazon Web Service, s.f.).

Este contexto no es otro que la denominada revolución digital, o industria 4.0. La cuarta revolución industrial es un fenómeno mundial en el que nos encontramos desde hace unos años (Rozo-García, 2020). Igual que sus predecesoras, se ha visto un cambio en las prácticas industriales anteriores para dar paso a nuevas técnicas habilitadas por los avances tecnológicos del momento.

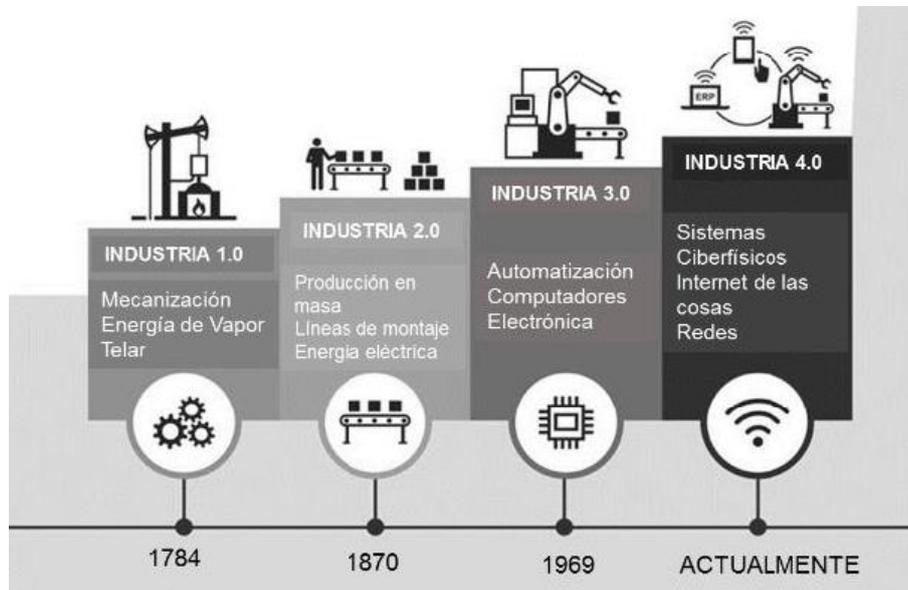


Figura 1. Línea del tiempo de las revoluciones industriales (Rozo-García, 2020)

En la *figura 1*, se puede observar la ubicación en el tiempo de cada una de las revoluciones industriales hasta el momento, así como los aspectos clave que las caracterizan. Destaca que las herramientas empleadas en la industria 3.0 son muy similares a las de su sucesora. La industria 4.0 fusiona los sistemas físicos propios de líneas automatizadas anteriores con nuevos sistemas digitales y su capacidad de transmitir grandes cantidades de datos de forma casi instantánea, sin importar la distancia (Raja Santhi & Muthuswamy, 2023)

Algunas de las tecnologías y técnicas más emblemáticas de la industria 4.0 hasta el momento se recogen en la *figura 2*.

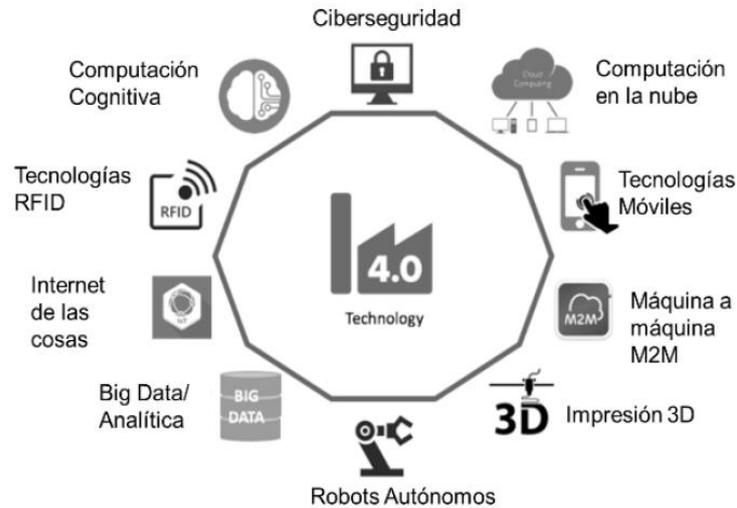


Figura 2. Tecnologías y técnicas relevantes en la industria 4.0 (Rozo-García, 2020)

Como consecuencia de este aumento exponencial de la capacidad de producción y procesado de información, se está comenzando a hablar de la necesidad de tecnologías relacionadas con la sostenibilidad y producción ecológica, denominándose en muchos textos como industria 5.0 (o industria 4.0S en los más conservadores) (Raja Santhi & Muthuswamy, 2023)

Se explicará como este proyecto en concreto se relaciona con la sostenibilidad, más concretamente con los ODS de la ONU, en el *Anexo I*.

## 1.2 EL GEMELO DIGITAL

El gemelo digital se puede definir como una réplica virtual de un proceso, producto o sistema físico que permite simular, predecir y optimizar el rendimiento en tiempo real (Gobierno de España, 2025)

Realmente, la definición de gemelo digital ha sido difusa en los últimos años, no estando muy clara la diferencia entre un gemelo y una simulación al uso (Amazon Web Service, s.f.). Sin embargo, proveedores y expertos coinciden en una serie de aspectos clave que son fundamentales para el gemelo digital:

En primer lugar, se hace hincapié en que un gemelo digital acompaña al producto o proceso a lo largo de su ciclo de vida. Es decir, el modelo tiene su utilidad durante la fase de planificación (para optimizar el proceso y permitir el trabajo en paralelo de montaje de y programación), en la fase de producción (seguimiento en tiempo real del proceso, mantenimiento predictivo...) y en la fase final (agregado de datos e incidencias que permiten facilitar el desarrollo futuro de otros productos). (Siemens, s.f.)

En segundo lugar, se considera que la interactividad es una cualidad esencial del gemelo digital. Mientras que en una simulación tradicional sólo suele ser posible modificar variables y alterar las condiciones antes o después de que se ejecute la simulación, los proveedores y expertos de gemelos digitales ven indispensable la capacidad de interactuar con el modelo mientras se está ejecutando, dando así más opciones para prever el comportamiento de la contraparte real y mejorar la capacidad de resolución de problemas. (Amazon Web Service, s.f.)

Teniendo en cuenta estas cualidades fundamentales, se puede clasificar a un gemelo digital según su nivel de integración con su contraparte física (también denominado nivel de madurez). (Subramanyan, 2024)

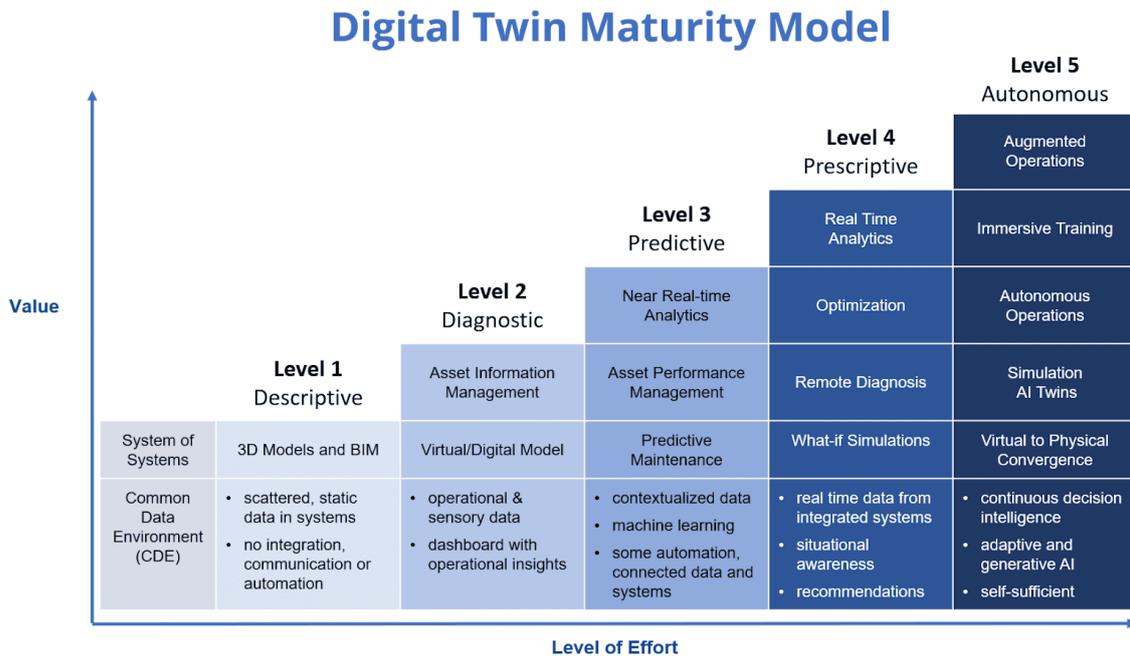


Figura 3. Clasificación de gemelos digitales según su nivel de integración. (Subramanyan, 2024)

Como se observa en la figura 3, existe una gran variedad de gemelos digitales dependiendo de su alcance y potencia. Un gemelo descriptivo (o de nivel 1) es muy similar a una simulación al uso, pero es útil durante la fase de planificación y se emplea como la base de los niveles superiores (Subramanyan, 2024). El nivel de diagnóstico (nivel 2) recibe información del sistema físico, permitiendo un seguimiento del estado del mismo. El nivel 3, además de controlar el estado actual, permite realizar predicciones en función de los datos recogidos en un momento específico. El nivel 4 permite realizar estas predicciones y análisis en tiempo real.

El máximo nivel es el estado del arte en lo que se refiere a monitorización de datos y digitalización. Se trata de integrar tecnología de inteligencia artificial a un gemelo digital de nivel 4. De esta forma, el sistema puede interpretar los datos y predicciones realizadas en tiempo real y, automáticamente, tomar decisiones y cambiar parámetros para, entre otros, aumentar la eficiencia del proceso. (Organización Internacional del Trabajo, s.f.)

### ***1.3 EL EMBALAJE EN LA REVOLUCIÓN DIGITAL***

A pesar de ser un proceso común en la mayoría de industrias de fabricación, el proceso de embalaje no ha visto especial integración de las tecnologías de industria 4.0 (*figura 2*) hasta hace recientemente (Dalmarco & Barros, 2018). Esto se debe a que es un proceso sencillo, pero difícil de generalizar debido a la gran diversidad de productos a embalar y sus distintos requerimientos.

Sin embargo, las tecnologías de trazabilidad de datos y optimización han empezado a aparecer en masa en procesos de empaquetado (Ellithy, 2024). Estas tecnologías permiten una mejor organización de la producción para garantizar que las líneas de embalaje permanecen paradas el menor tiempo posible. Además, la trazabilidad de datos ofrece un mayor control de los productos embalados, permitiendo su seguimiento hasta el almacén tras el embalaje e incluso facilitando el procesamiento de pequeñas series.

Una de las formas más llamativas en las que se aprecia la creciente presencia de tecnologías digitales en procesos de embalaje es el empleo de robots colaborativos. El proceso de apilar y cerrar las cajas llenas de producto solía recaer sobre los trabajadores, siendo aún el caso en muchas industrias del mundo. Sin embargo, la tecnología de brazos robot permite realizar este trabajo de forma rápida y sin riesgo de lesiones en los trabajadores. (Redacción Futuro Eléctrico -, s.f.)

Adicionalmente, con un mayor número de sensores, se puede hacer uso de un robot colaborativo, cumpliendo la misma función que los brazos robot, pero permitiendo a los trabajadores circular alrededor o complementar las tareas del robot.



*Figura 4. Ejemplo de configuración de brazo robot en estación palletizadora (TMG Impianti, 2025)*

En la *figura 4* se ilustra un ejemplo de una línea paletizadora de cajas. En este caso, el brazo robot no es colaborativo, denotado por las barreras que impiden el paso del personal al área de trabajo.



## Capítulo 2. DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS

En este apartado se discutirán las tecnologías y software empleado en el proyecto.

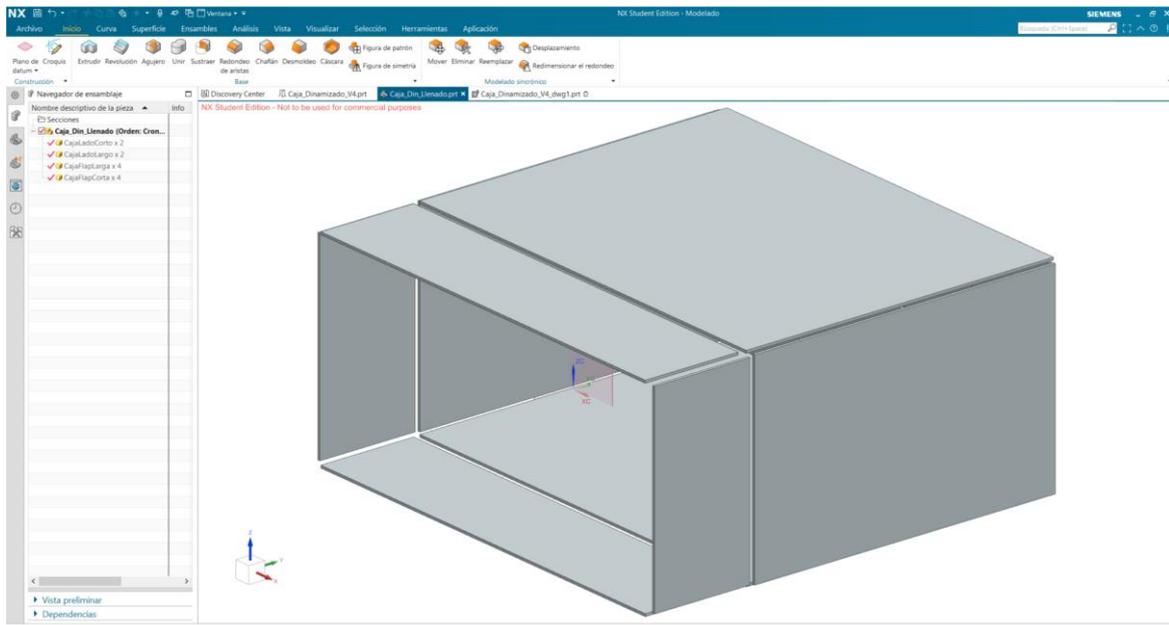
### ***2.1 REPRESENTACIÓN ESTÁTICA***

Para desarrollar un gemelo digital, es necesario contar con una representación digital de la contraparte física, más o menos detallada según los requerimientos. Esto se consigue comúnmente con programas CAD (Computer-aided design) o CAE (Computer-aided engineering) aunque también es posible con programas similares de CAM (Computer-aided manufacturing) entre otros. (Boschert, 2016)

En este proyecto, se empleará el software NX CAD, de Siemens. Se ha seleccionado este debido a su cualidad de agregar programas adicionales al entorno NX, que permiten interacciones adicionales con los modelos creados. Algunos ejemplos son Part Manufacturing y Electrical Sytems, además del add-on que se utilizará para crear el *entorno de simulación*, NX MCD (Siemens, s.f.)

Adicionalmente, la selección del programa NX tiene la ventaja de ser del mismo proveedor que el *resto de software y PLC* disponible en la universidad. Esto tiene la ventaja de facilitar enormemente las comunicaciones entre el gemelo digital y la contraparte física.

Se incluye en la *figura 5* una captura del entorno del programa NX CAD.



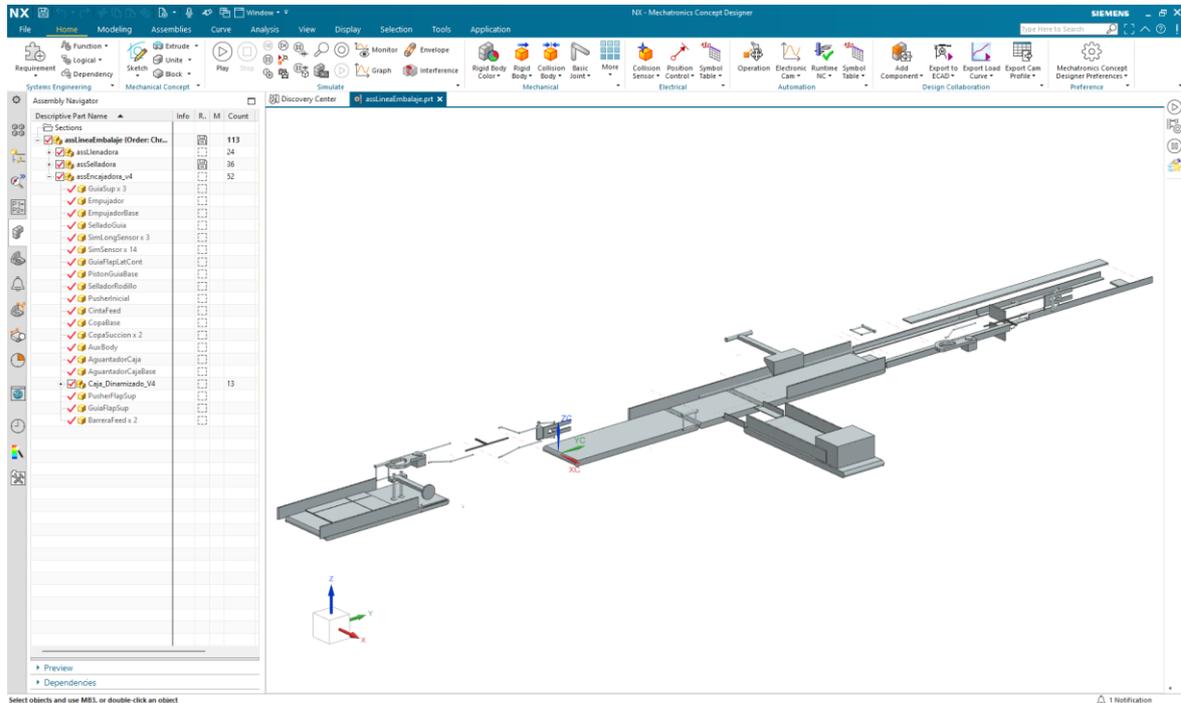
*Figura 5. Entorno de programa de NX Modelado*

## **2.2 ENTORNO VIRTUAL**

Para poder ejercer las funciones de un gemelo digital, es necesario ampliar sobre el diseño estático anterior y añadir las reglas por las que se rige el modelo. Dependiendo de la complejidad del modelo, puede este entorno virtual abarcar desde unas pocas líneas de código (p.e. una luz que se enciende según un paquete avanza por la cinta) hasta complejas simulaciones de partículas (p.e. gemelo digital de un pulmón (Fernández-Tena, Arnedo, Houzeaux, & Eguzkitza, 2024)).

Para este proyecto se optará por una solución relativamente compleja a través del uso de NX MCD también de Siemens. Como se explicó en el apartado 2.1, el software NX permite instalar programas adicionales para construir o añadir cualidades a los modelos CAD creados. En este caso MCD (Diseñador de conceptos mecatrónicos) es un motor de simulación basado en modelo físico (Siemens, s.f.). Es decir, se permite añadir a los objetos creados en CAD cualidades del mundo físico (masa, cuerpo de colisión o rigidez, factor de

fricción) y aplicar fuerzas sobre los mismos. El motor se encarga de que estos cuerpos creados se comporten según las leyes de Newton del mundo real.



*Figura 6. Entorno de programa NX MCD*

Se puede observar en la *figura 6* que el entorno del programa es prácticamente idéntico al de NX CAD (*figura X-1*). Al estar ambos programas comprendidos en el software principal NX, presentando las mismas ventajas en cuanto a facilidad de conexión con el exterior.

### **2.3 PROGRAMACIÓN DEL CONTROL**

La interconexión con el exterior es fundamental para un gemelo digital. Aunque en nuestro caso (especificado en *capítulo 4*) no exista contraparte física, se buscará simular una conexión al exterior a través de un controlador PLC (Programmable Logic Device). Un PLC, o autómatas programables es un hardware especializado diseñado para gestionar tareas de control en entornos industriales (Omron, s.f.). Es decir, permite controlar accionamientos industriales básicos que funcionen tanto con entradas analógicas o binarias. También gestiona la información recibida de los sensores.

El PLC que se va a emplear no es realmente un PLC físico, sino una simulación empleando PLCSIM Advanced, también de Siemens. Este programa permite emplear el poder de procesamiento de un PC para ejercer las funciones de un PLC físico. Cuenta con la ventaja de ser del mismo proveedor que los softwares anteriores, facilitando la comunicación entre el entorno digital y el controlador externo.

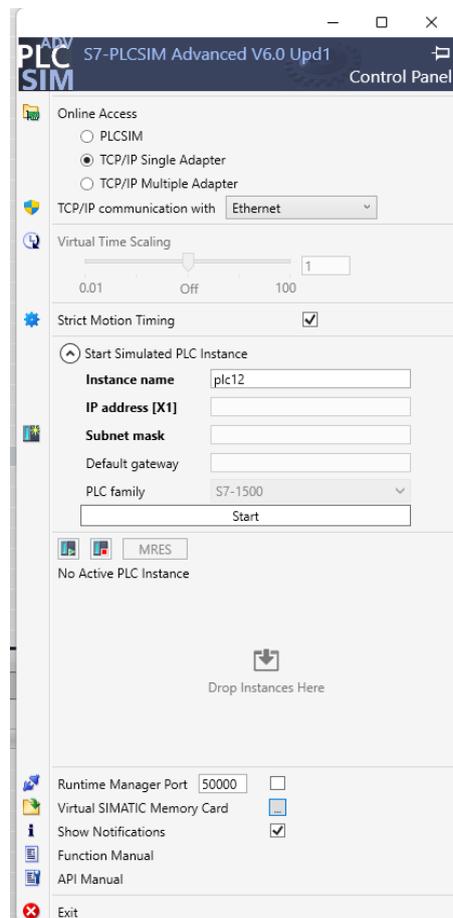
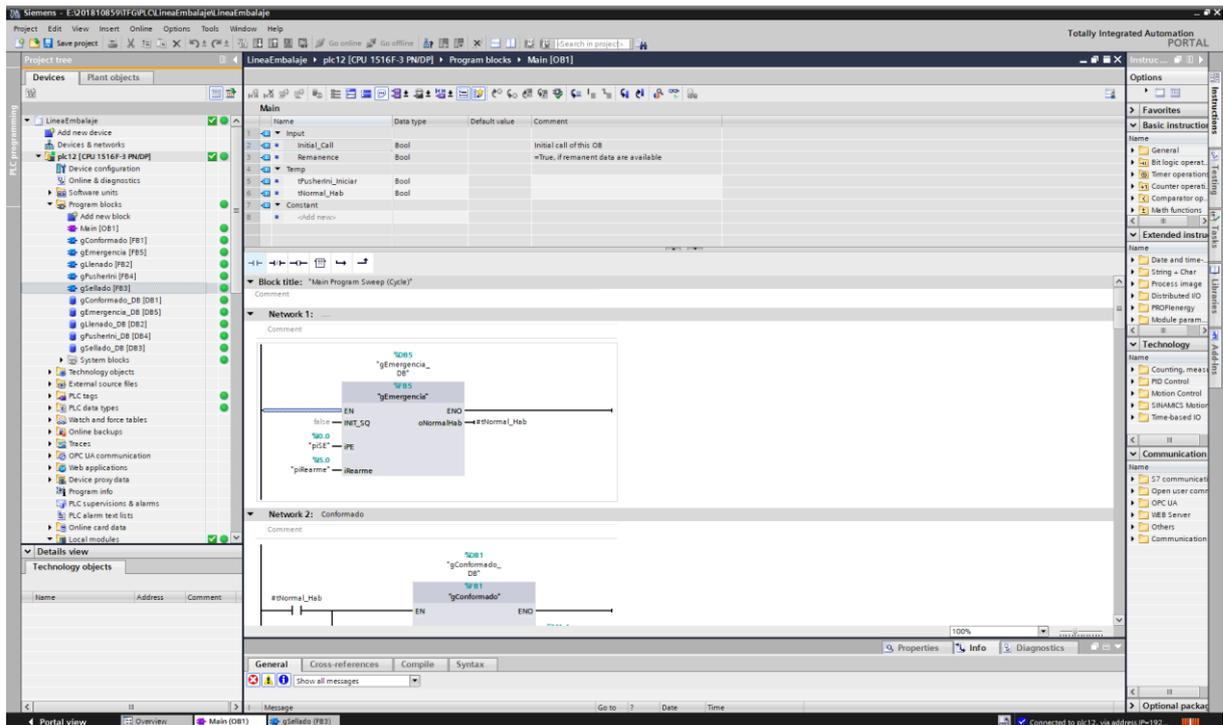


Figura 7. Entorno de programa PLCSIM Advanced

En la figura 7 se observa el entorno de programa PLCSIM Advanced.

Una vez se tiene claro qué dispositivo se va a emplear, es necesario hablar de cómo se programará. El software elegido es TIA Portal (Totally Integrated Automation Portal), también de Siemens. Este programa no sólo permite la programación del PLC con los lenguajes que se discutirán a continuación, sino que también controla las comunicaciones

entre los programas de Siemens. Es por esto que elegir todos los programas del mismo proveedor supone un ahorro de tiempo, ya que no es necesario programar las comunicaciones de manera individual. (Siemens, s.f.)



*Figura 8. Figura entorno TIA Portal*

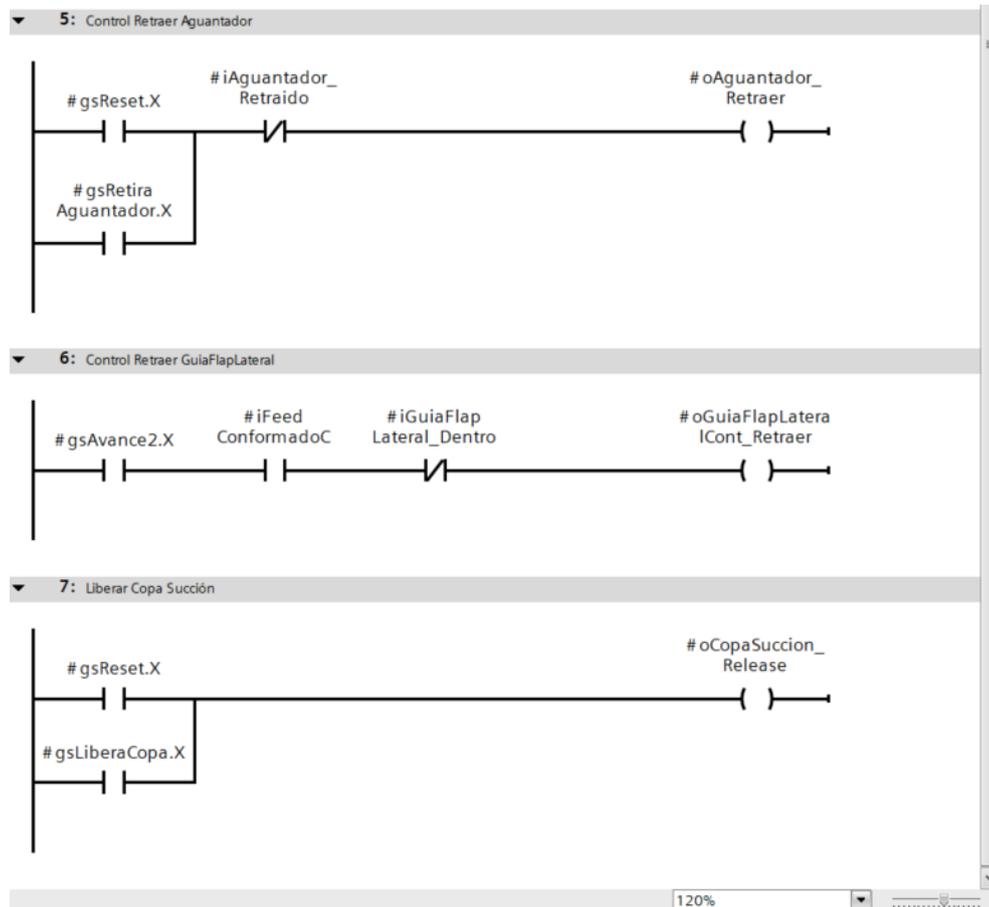
Se observa en la *figura 8* el entorno de TIA Portal.

Existen cuatro formas principales de programar un PLC (Comisión Electrotécnica Internacional, 1993). Sin embargo, en este trabajo se han empleado exclusivamente dos.

### **2.3.1 DIAGRAMA DE CONTACTOS**

El diagrama de contactos es una manera simplificada de programar que imita un esquema de lógica cableada, empleando interruptores normalmente abiertos (NO) y normalmente cerrados (NC) para aplicar lógica sencilla. Las salidas del sistema se representan como bobinas, mientras que las entradas son los interruptores. La línea de la izquierda representa el equivalente a la fuente de tensión, mientras que la derecha es la tierra. Existen bloques

adicionales que insertar en los hilos, como contadores o relojes. Pero su uso en el trabajo es mínimo.



*Figura 9. Ejemplo de diagrama de contactos en TIA Portal*

En la *figura 9* se puede observar los elementos los elementos principales de un diagrama de contactos, en concreto los interruptores NO y NC, así como las bobinas de salida.

La iteración del lenguaje propia del software de Siemens se denomina KOP

### 2.3.2 GRAFCET

El grafcet es una metodología para especificar el comportamiento de un sistema secuencial (UNE, 2022)

Un graficet se compone por un conjunto de estados, denominados etapas, en los que puede encontrarse un sistema; así como las condiciones necesarias para pasar de una etapa a otra. Las etapas pueden tener variables asociadas (p.e. el tiempo que se permanece en la etapa o si la etapa está activa), así como acciones (encender un LED mientras el sistema esté en un estado, poner un contador a cero cuando se sale del estado, etc.).

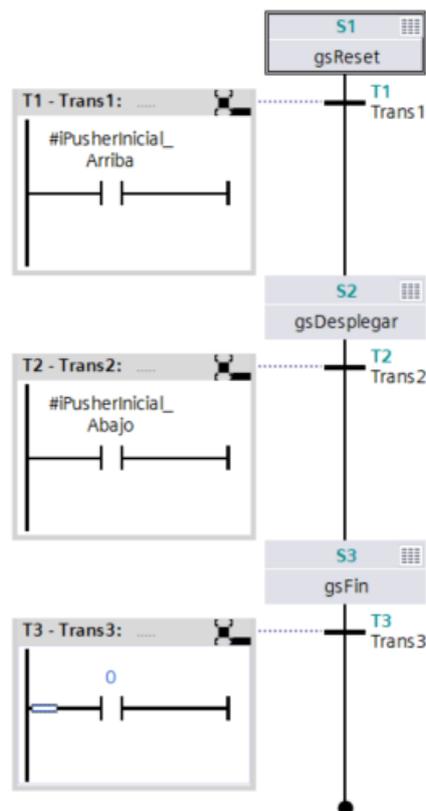


Figura 10. Ejemplo de graficet sencillo para control de empujador de solapa

En la figura 10 se observa un graficet programado en TIA Portal. Se aprecian las etapas y las transiciones entre las mismas.

La iteración del lenguaje propia de software de Siemens es GRAPH



## **Capítulo 3. ESTADO DE LA CUESTIÓN**

En la actualidad, existen multitud de empresas que ofrecen gemelos digitales, en su mayoría start-ups o los propios proveedores de maquinaria.

El embalaje no es una excepción. Muchos proveedores y start-ups están dispuestas a integrar gemelos digitales en líneas existentes, además de gestionar la creación de nuevas líneas pensadas para una más fácil integración digital. (Mordor Intelligence, 2023)

Sin embargo, es importante destacar la postura española y europea frente a los gemelos digitales. En concreto, la UE está invirtiendo considerablemente en proyectos de gemelos digitales de cuerpos humanos (iDavinci, 2021), además de monitorizar de cerca la evolución del sector en contexto europeo y mundial, calificando a la tecnología de gemelo digital como una con “gran impacto en nuestro futuro” (Eulaerts, Grabowska, & Bergamini, 2024)

El gobierno de España se mantiene en línea con la UE en este aspecto, incluyendo la tecnología del gemelo digital en su Agenda España Digital (Gobierno de España, 2025)

Esta Agenda es una hoja de ruta establecida por el gobierno de España para promover la transformación digital en todos los sectores de la economía. Entre los objetivos más importantes destacan: Impulsar la conectividad digital, fomentar la transformación digital de la economía, fortalecer la seguridad digital, promover la innovación y el emprendimiento digital y mejorar la competencia digital de la ciudadanía. (Gobierno de España, 2025)

Este último punto es de especial relevancia de cara a este trabajo. Debido a la naturaleza técnica de un gemelo digital, no es muy accesible para el público. Además, la mayoría de documentación y tutoriales encontrados de forma gratuita en la web son, por lo general, bastante anticuadas. La excepción suele ser la documentación aportada por los proveedores de software necesario para hacer el gemelo digital. (Siemens, s.f.)



## **Capítulo 4. DEFINICIÓN DEL TRABAJO**

### **4.1 JUSTIFICACIÓN**

A la vista del actual panorama de gemelos digitales de líneas modernas [*capítulo 3*] y más avanzados automatismos, se va a realizar el gemelo digital de una línea de embalaje con accionamientos más sencillos. Se decide que el producto a embalar será uno indeterminado, pero agrupado en bandejas. Se estudiará la viabilidad de este tipo de proyectos de digitalización de líneas menos complejas, haciendo hincapié en aspectos como las ventajas que presenta a la hora de hacer el set-up o la accesibilidad de la tecnología para usuarios sin extensiva formación.

### **4.2 OBJETIVOS**

El objetivo principal de este trabajo es crear un gemelo digital de nivel 1 [*capítulo 2*] de un proceso de embalaje sencillo. El producto a embalar no se especifica, pero sí se plantea que venga ordenado en bandejas apiladas. Cómo se apilan estas bandejas no será parte de este trabajo. Con este fin, será necesario diseñar dicha línea de embalaje, antes de pasar al proceso de digitalización. [*capítulo 5*]

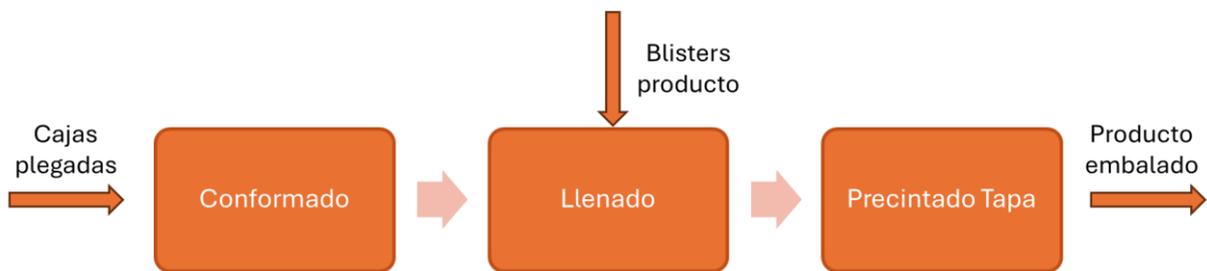
Una vez conseguido el gemelo digital operativo de nivel 1, se discutirán los beneficios del mismo. En concreto, se hará un análisis de cómo se puede emplear el gemelo digital para detectar fallos y mejorar el diseño original.

Se prestará especial atención al cumplimiento de la norma vigente en cuanto a maquinaria de embalaje. En concreto, se seguirá la norma *UNE-EN 415-3*. En ella se indica la necesidad de incluir dispositivos de parada de emergencia y de un diseño intrínsecamente seguro.

## 4.3 METODOLOGÍA

### 4.3.1 FASES DEL PROCESO DE EMBALAJE

Se dividirá la línea de embalaje en tres sub-estaciones independientes: conformadora, llenadora, y precintado de tapa. De esta forma se modularizan las máquinas necesarias, permitiendo una más fácil detección de errores y depurado de código.



*Figura 11. Esquema simplificado de las estaciones de la línea de embalaje*

En la *figura 11* se introduce un diagrama de proceso de la línea en su conjunto.

La fase de conformado será en la cual, partiendo de una caja de cartón plegada, se dará forma a la caja en sí, además de sellar su base en preparación para ser llenada. El método mediante el cuál se alimentan las cajas plegadas a la línea no formará parte del proyecto.

Posteriormente, en la fase de llenado, se insertará el producto indeterminado, ya apilado en bandejas, en la caja. El método mediante el cual se producen y apilan las bandejas de producto no formará parte del proyecto.

Finalmente, en la fase de sellado, se sellará la tapa de la caja con cinta y se depositará la caja para su procesamiento posterior. El método mediante el cuál se retiran de la línea las cajas no formará parte del trabajo.

### 4.3.2 FASES DEL DESARROLLO DEL GEMELO DIGITAL

La creación y configuración también se hará en fases, tal cómo se discutió en el *apartado 2*. En concreto, se desarrollará el gemelo en las fases escritas en la *tabla 1*:

*Tabla 1. Orden y descripción de fases de desarrollo del gemelo digital*

Nº Fase	Nombre de la fase	Objetivos
1	Modelado sistema digital	Se creará un modelo CAD de los distintos elementos y subestaciones de la línea.
2	Dinamizado de entorno digital	Se crearán las reglas mediante las que se regirá el entorno digital del gemelo. Esta fase será la más importante de cara a las prestaciones del gemelo.
3	Programación control	Se programará el PLC externo para controlar los accionamientos de la línea en modo automático.

Es importante destacar que cada fase dependerá de la anterior. Es decir, el dinamizado del entorno empleará el modelo CAD como referencia para crear las reglas del entorno. A su vez el PLC podrá interactuar con el gemelo según cómo le esté permitido en el entorno. Se explicará en detalle cada fase en su respectivo capítulo.

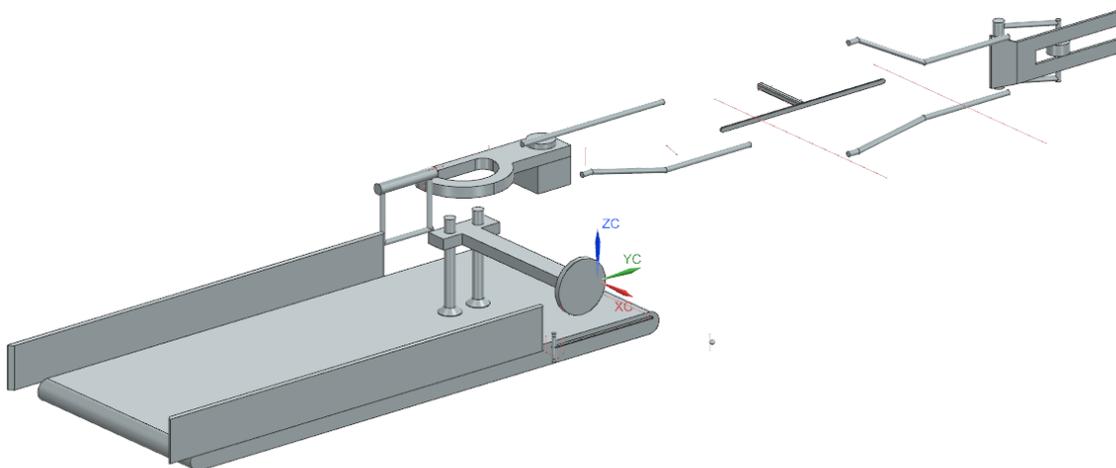


## Capítulo 5. DISEÑO DEL PROCESO DE EMBALAJE

En este capítulo se explicará el diseño escogido para línea de embalaje. Debido a que no existe contraparte física, se ha primado el empleo de elementos genéricos siempre que sea posible. En este apartado se explicará también, en conjunto, el proceso de modelado de las distintas subestaciones.

### 5.1 DISEÑO CONFORMADORA

La conformadora es la subestación con mayor complejidad de las tres. Se puede observar el diseño final en la *figura 12*. Se detallará cada componente y su función a lo largo del apartado.



*Figura 12. Vista trimétrica de modelo de estación conformadora*

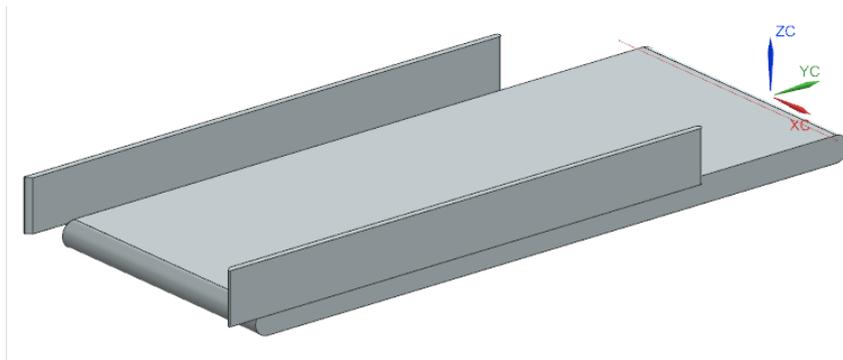
En el *Anexo II* se pueden consultar el proceso en distintos estados. Se recomienda su consulta antes de continuar con el capítulo, para mayor claridad en las explicaciones.

Nótese que falta la cinta transportadora que conecta con la siguiente estación. Esto se debe a que pertenece al ensamblado de la estación llenadora [*apartado 5.2*].

### **5.1.1 CINTAS Y BARRERAS**

En primer lugar se encuentra la cinta de alimentación, por la cuál llegarán las cajas plegadas. Se decide incluir también barreras, para asegurarse de que se mantiene la caja en la posición adecuada. La cinta se y barreras se modelan como prismas con bordes redondeados, tratando de evitar bordes afilados según las recomendaciones de la norma *UNE-EN 415-3*.

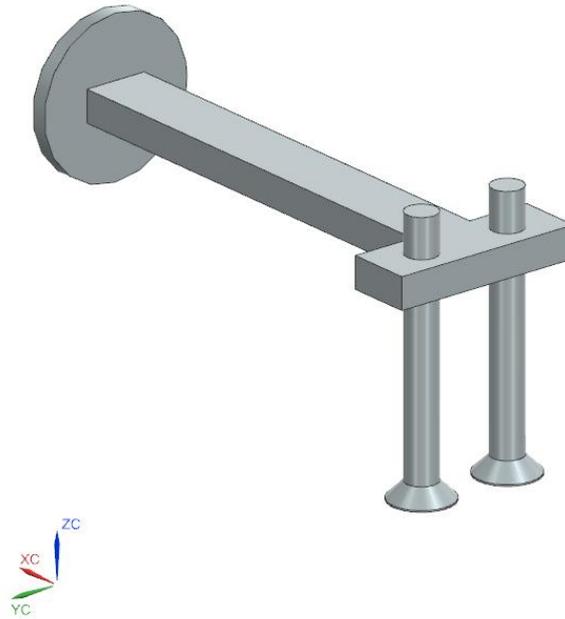
Se incluye el conjunto en la *figura 13* a continuación:



*Figura 13. Modelo CAD de la cinta transportadora de alimentación de cajas y barreras*

### **5.1.2 BRAZO DE SUCCIÓN**

El brazo de succión será el elemento que levante la pared superior de la caja y la conforme según corresponde.



*Figura 14. Modelo CAD del brazo de succión*

Se observa en la *figura 14* que el conjunto está formado por tres objetos. Dos vástagos, con sus respectivas copas de succión en el extremo inferior, y una base sobre la que deslizan. No se modelan, pero muelles permiten a los vástagos permanecer a la distancia deseada. Más información sobre cómo se introduce esta función en el gemelo en el *apartado 6.6.1*.

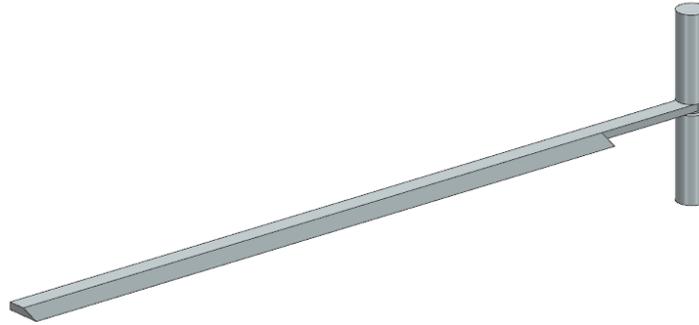
Se ha elegido esta configuración para asegurarse de que se hace contacto con el cartón de la caja en cualquier situación. Esto es, la posición final de la base una vez desciende hacia la caja es tal que los muelles se comprimen contra la misma.

La base del brazo tiene la capacidad de moverse tanto en vertical como en horizontal, siendo este elemento el que moverá la caja a lo largo del resto de la subestación.

### **5.1.3 AGUANTADOR**

El aguantador funciona a la par que el brazo de succión. No es más que una placa que sujeta la caja mientras la copa de succión ejerce fuerza vertical. De esta manera, se asegura que la

copa de succión conforme la caja adecuadamente; y no simplemente levante la caja de cartón entera al ascender.



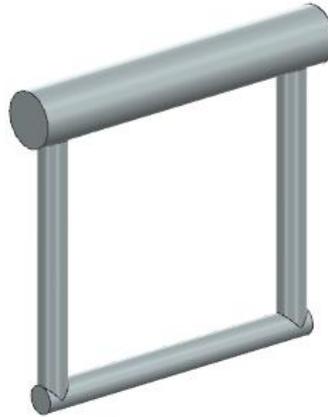
*Figura 15. Modelo CAD del aguantador*

En la *figura 15* se aprecia el diseño del componente. La placa puede rotar sobre su base para introducirse o retirarse según sea necesario. La base se puede mover en horizontal, acompañando los movimientos de la copa de succión.

Una vez la copa de succión comienza su ascenso, el aguantador se introduce entre las paredes de la caja. De este modo, hará presión en la parte inferior de la caja, opuesta a la de la copa de succión y, por tanto, aplicando tensión sobre la caja para que se conforme.

#### **5.1.4 EMPUJADOR SOLAPA SUPERIOR**

Para poder cerrar la caja, es necesario que las solapas de los lados cortos se doblen antes que las de los lados largos. Debido a la configuración de la línea, la solapa larga superior cae por efecto de la gravedad, impidiendo el cierre de las solapas cortas. Para eso se emplea un empujador, como el de la *figura 16*.



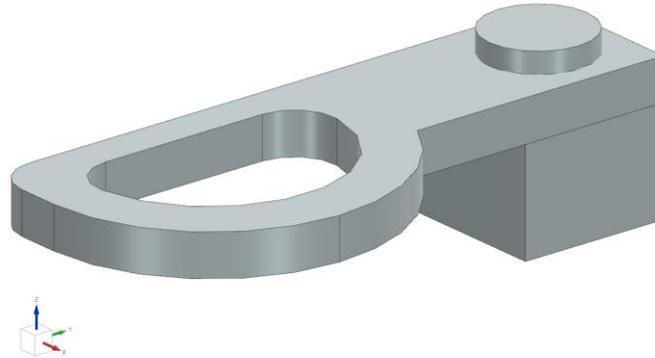
*Figura 16. Modelo CAD de empujador de solapa superior.*

Su funcionamiento es simple, rotando sobre el eje de mayor grosor, la barra guía paralela asciende o desciende según sea necesario. Se montará justo después de la zona de recogida de las cajas, accionándose una vez el brazo de succión y el aguantador hayan conformado la caja.

Una vez levantada la solapa, una barra metálica fija la mantendrá en posición hasta después del cierre de las solapas laterales.

### **5.1.5 EMPUJADOR SOLAPAS LATERALES**

Si se tiene en cuenta que el cartón no es totalmente plástico, el diseño de los empujadores de las solapas laterales debe cambiar para que éstas permanezcan en posición hasta que las solapas largas se cierren sobre ellas. Para ello se ha diseñado otro tipo de empujador como se representa en la *figura 17*.



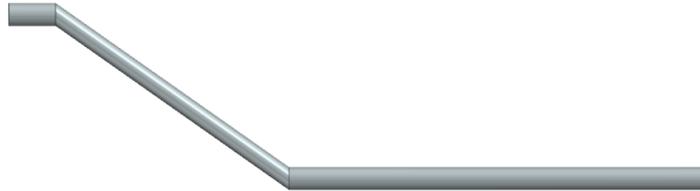
*Figura 17. Modelo CAD del empujador de solapas laterales*

Se ha diseñado de manera que haya una mayor superficie de contacto, así como con bordes redondeados para dirigir las solapas del cartón. Se ha vaciado el interior para reducir material, pero al ser solamente un modelo CAD no sería estrictamente necesario para el diseño del gemelo. La parte móvil es el componente hueco, que gira en torno a un eje fijo.

Este empujador sólo es necesario para empujar la solapa corta opuesta al sentido de avance, ya que la más cercana al sentido de avance será plegada gracias a una guía.

### **5.1.6 BARRAS GUÍA DE SOLAPAS**

Se empleará una serie de barras para mantener en posición las solapas una vez colocadas por los empujadores. La primera es una barra cilíndrica que mantiene la solapa superior en posición tras su respectivo empujador. Las siguientes barras son cilíndricas, pero dobladas de tal manera que las solapas deslicen sobre ellas y cierran la caja por sí mismas, sin necesidad de accionamientos adicionales además del avance del brazo de succión.

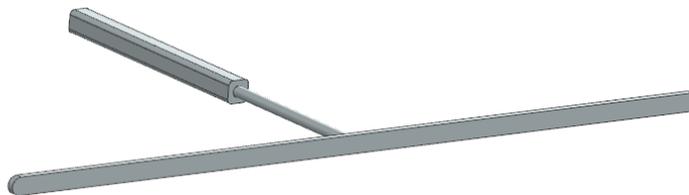


*Figura 18. Vista de planta del modelo CAD de las barras guía*

En la *figura 18* se observa una vista de planta de una de las guías. Ésta se fijará en el modelo con una orientación determinada dependiendo de cuál de las tres solapas se está tratando de guiar.

### **5.1.7 PISTÓN GUÍA.**

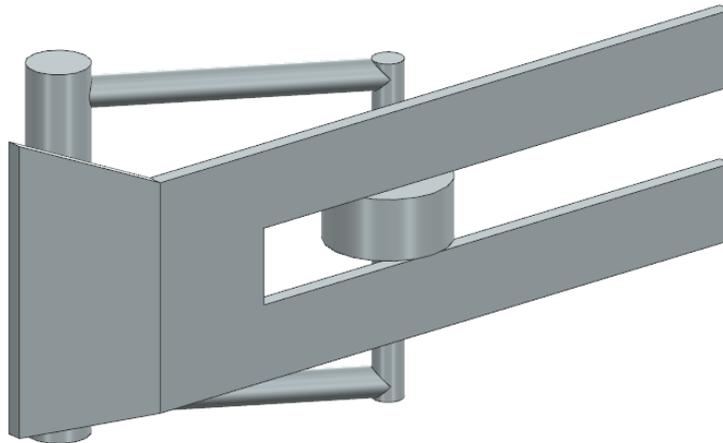
Este pistón guía tiene una función similar la de las barras guía. Su labor es aguantar en posición las solapas cortas de la caja, mientras las solapas largas se cierran sobre ellas gracias a las acciones de las barras guía. Sin embargo, es necesario que se retire sólo en el momento antes de que la base se cierre por completo, para asegurar la correcta posición de la caja. Por esto, a esta guía se le asocia un pistón, que la retraerá justo antes de cerrarse la base. Se puede ver el diseño de la pieza en la *figura 19*.



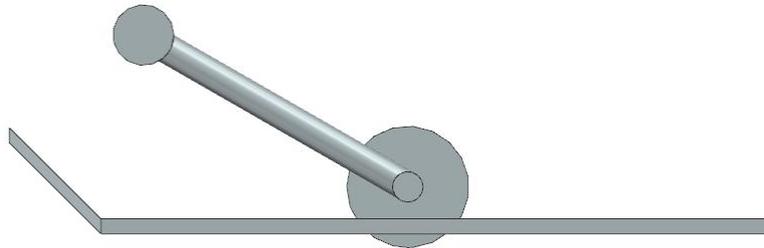
*Figura 19. Diseño CAD de Pistón Guía de solapas cortas, con pistón extendido*

### **5.1.8 DISPENSADOR DE CINTA ADHESIVA**

El dispensador de cinta es crucial para el proceso de embalaje. Se detallará su función clave en el entorno digital en el *capítulo 6.6.2*, pero antes es necesario crear un modelo CAD con un nivel de detalles adecuado. El mecanismo para un dispensador de cinta es relativamente complejo si se tiene en cuenta que se debe desenrollar la cinta, pelar la capa protectora para descubrir el adhesivo y finalmente cortar. Se ha considerado que este nivel de detalle no es necesario para el modelo digital, optando por representar este dispositivo como aparece en la *figura 20* y *figura 21*.



*Figura 20. Vista trimétrica de modelo CAD de dispensador de cinta adhesiva*



*Figura 21. Vista de planta de modelo CAD de dispensador de cinta adhesiva*

El modelo del dispensador de cinta consiste en una placa fija que hace de tope, de modo que la pared de la caja esté en contacto con ésta. Esta placa tendrá una apertura a través de la cual se aplicará la cinta. Hasta este punto el modelo es muy similar uno real. Sin embargo, se han tomado importantes simplificaciones en los siguientes componentes.

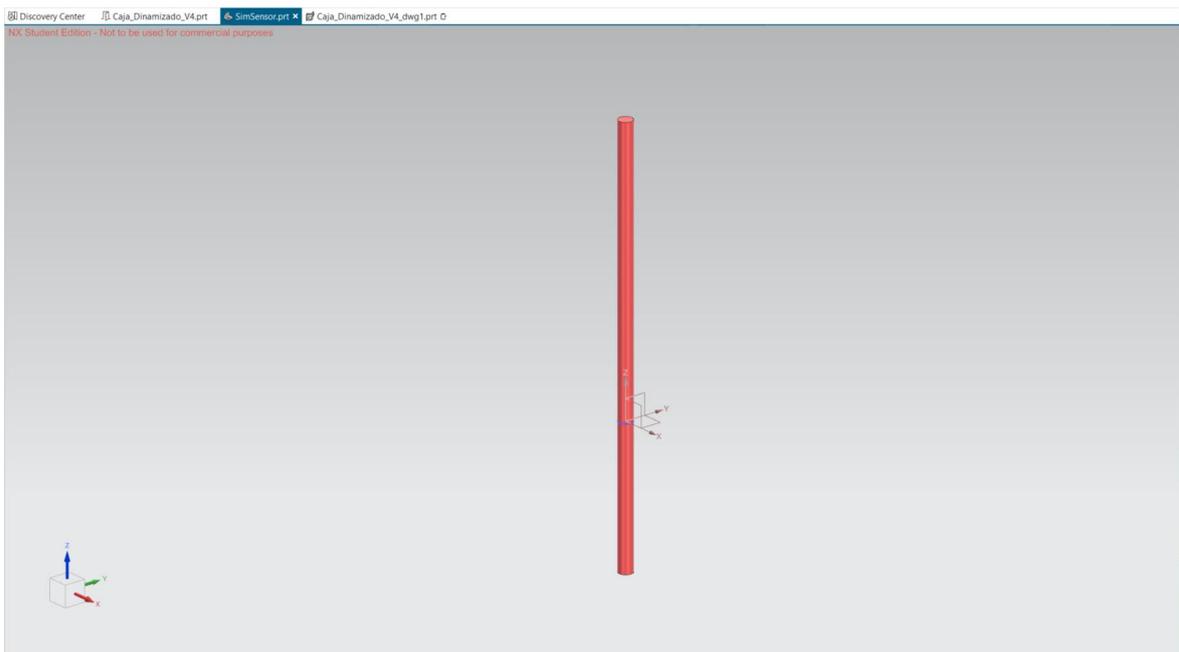
En concreto, el rodillo que se ve en la figura 20 y figura 21 será el equivalente a todo el resto del dispositivo de dispensado de cinta. Este rodillo gira en torno a un eje libremente. Este eje gira también en torno a otro de mayor grosor, pero se aplicará un resorte en *el capítulo 6*. Esto último permite que el rodillo retroceda ante la caja, pero haga presión contra la misma.

### **5.1.9 SENSORES**

Junto a todos los dispositivos anteriores, es necesario instalar una serie de sensores para controlar el funcionamiento. Se detallará en el *apartado 6.5* cómo se han programado los sensores en el entorno digital.

Para modelar los sensores en CAD, se ha empleado un cilindro fino translúcido de color rojo, para distinguirlo del resto de los elementos físicos. Dependiendo de su uso, se emplea una variante u otra.

La primera variante, es el sensor empleado para los fines de carrera de los accionamientos. En el capítulo 6 se explicará porque se ha decidido incluir sensores de fin de carrera. No se requiere de mucho volumen ni distancia para realizar esta función, por lo que son de reducido tamaño en comparación con el resto del modelo. Se representa en la *figura 22*.



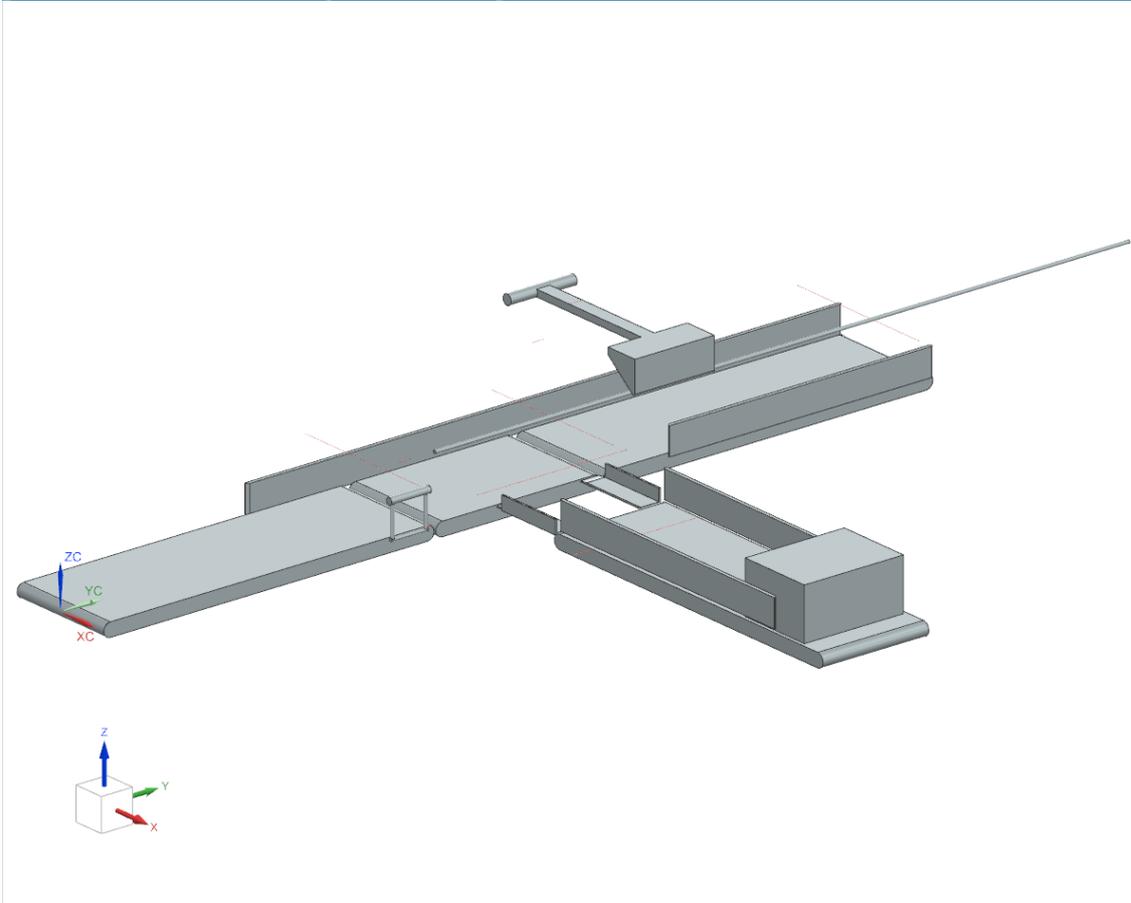
*Figura 22. Modelo CAD de sensor de fin de carrera*

La segunda variante, el sensor largo, se emplea para detectar la posición de la caja a lo largo de la línea. Es necesario que sea, al menos, tan largo como ancha es la cinta transportadora. Se trata del mismo modelo que la primera variante, pero extrudido de modo que puede detectar la caja en cualquier punto de la cinta, o del trayecto una vez el brazo de succión sujete la caja.

Esta estación cuenta con tres sensores de posición para la caja. El primero será responsable de detectar cajas en el extremo final de la cinta transportadora. El segundo se activa cuando la caja está en la posición adecuada para desplegar los empujadores de solapas laterales. El tercer y último sensor de posición detecta cuando la caja alcanza el punto en el cuál se debe retraer el pistón guía.

## 5.2 DISEÑO LLENADORA

La estación de llenado es mucho más compleja que la anterior estación de conformado. Se puede observar en su conjunto en la figura 23.



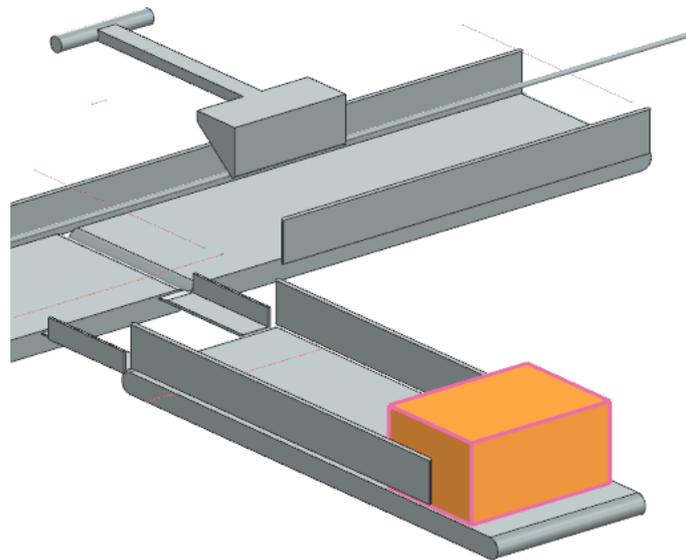
*Figura 23. Vista trimétrica de modelo de estación de llenado*

Se puede consultar el *Anexo II* para ver el gemelo digital en distintas fases, para poder comprender mejor el apartado.

Afortunadamente, la estación de llenado comparte muchos componentes con la estación de conformado, como los sensores o las cintas transportadoras. Se indicarán las principales diferencias en este apartado, así como los elementos distintivos.

### 5.2.1 BANDEJAS DE PRODUCTO

Las bandejas de producto se han modelado como un bloque sólido. Para decidir su tamaño, se ha tomado el tamaño de 4 bandejas apiladas estándar. Dando como resultado un prisma de 30x22x15 centímetros. Se puede observar el prisma resultante en la *figura 24*.



*Figura 24. Diseño CAD de las bandejas de producto, resaltadas en color.*

### 5.2.2 CINTAS TRANSPORTADORAS

En la *figura 23* se puede apreciar que hay un conjunto de 4 cintas transportadoras.

Desde la izquierda, en primer lugar, se observa la cinta de alimentación de la estación de llenado. El brazo de succión de la estación anterior deposita sobre esta cinta las cajas conformadas, con la base sellada.

Después, se encuentra la cinta intermedia. Esta cinta, de movimiento más preciso, permite alinear la caja con las bandejas de producto.

En paralelo, la cinta de producto se encarga de alimentar la estación con las bandejas de producto listas para embalar. Se puede observar que no llega hasta la cinta intermedia, sino que deposita las bandejas sobre unos railes, sobre los cuales se detendrá hasta que el empujador de producto descienda e impulse las bandejas dentro de la caja.

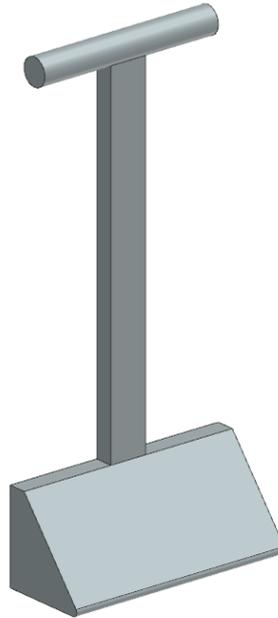
Por último, la cinta de salida conecta la estación actual con la de sellado, la última de la línea, transportando las cajas llenas de producto.

### **5.2.3 EMPUJADOR SOLAPA SUPERIOR**

Su funcionamiento y diseño es exactamente el mismo que el empujador de solapa superior de la estación de conformad. La única diferencia radica en que la guía metálica que sucede al empujador es mucho más larga, extendiéndose hasta incluso después del final de la línea de llenado. En concreto, hasta después de los empujadores de solapas laterales de la estación de sellado.

### **5.2.4 EMPUJADOR PRODUCTO**

Esta pala tiene como función empujar las bandejas de producto hasta dentro de la caja. Se observa el diseño en la *figura 25*.



*Figura 25. Modelo CAD del empujador de producto*

La pala puede rotar en torno al eje fijo superior, permitiendo su descenso describiendo una trayectoria circular. La forma trapezoidal de la pala se debe a que se ha buscado maximizar la superficie de contacto inicial entre la pala y las bandejas de producto, distribuyendo la fuerza del impacto en una mayor superficie.

### **5.2.5 SENSORES**

De igual manera que para los sensores de la encajadora, se tienen dos tipos de sensor. Esta vez se tienen dos parejas de fines de carrera, un par por cada accionamiento.

En cuanto a los sensores largos, se ha empleado un total de 5, 3 para controlar el avance de la caja y 2 para el avance de las bandejas de producto.

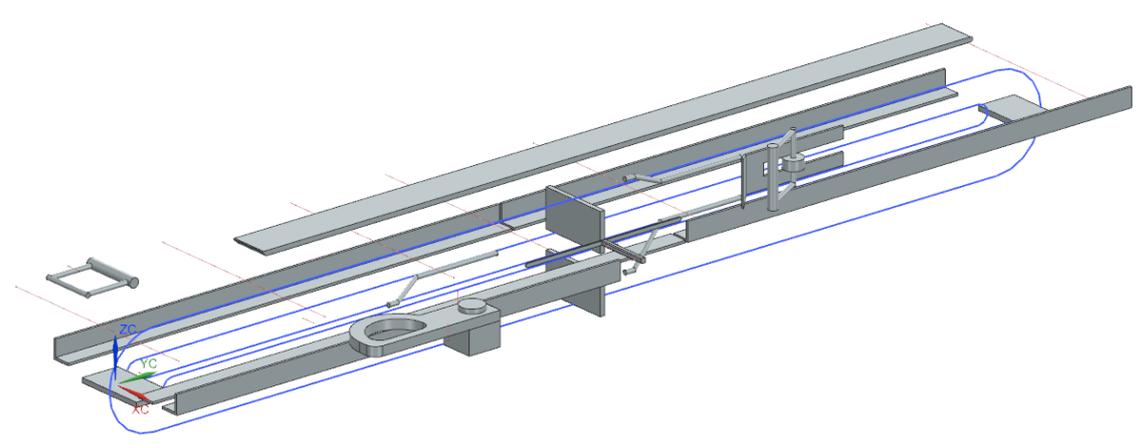
En cuanto a los sensores de posición del producto, se tiene uno para detectar presencia en los raíles, a la espera del descenso del empujador de producto; y otro al final de la cinta transportadora de producto.

Para la detección de cajas, se tiene un sensor por cada final de cinta transportadora.

### **5.3 DISEÑO SELLADORA**

La selladora de tapas es el proceso final de la línea de embalaje. Es prácticamente idéntica a la segunda mitad de la estación conformadora, salvo por el método empleado para impulsar las cajas. Por tanto, se explicarán sólo los elementos distintivos, dejando la explicación de las guías, el empujador de solapa lateral el pistón guía y el dispensador de cinta en el apartado de la estación conformadora.

Se observa la estación al completo en la *figura 26*.



*Figura 26. Vista trométrica del modelo CAD de la estación de sellado de tapa*

Nótese que la solapa superior sigue estando sostenida por la barra guía hasta después del empujador de solapa lateral. No se incluye en la figura ya que pertenece al ensamblaje de la estación de llenado.

#### **5.3.1 EMPUJADOR DE ALIMENTACIÓN**

Este dispositivo tiene el mismo diseño que los empujadores de solapas superiores [XXX] de estaciones anteriores. Su función es distinta esta vez, empujando la caja llena de producto desde el final de la cinta de salida de la estación de llenado hasta los raíles de la estación de sellado. De esta manera, se sitúa la caja en la trayectoria de las palas impulsoras [XXX]

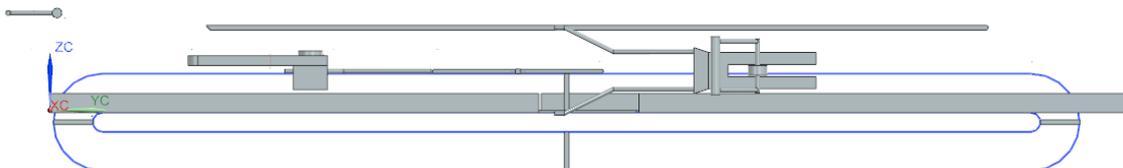
### 5.3.2 RAILES Y TECHO

Para esta estación se ha optado por una impulsión por palas, por lo que será necesario guiar la trayectoria de la caja con raíles. Adicionalmente, se añade una guía superior para mantener la caja presionada contra los raíles y asegurando que la pala está en contacto en todo momento.

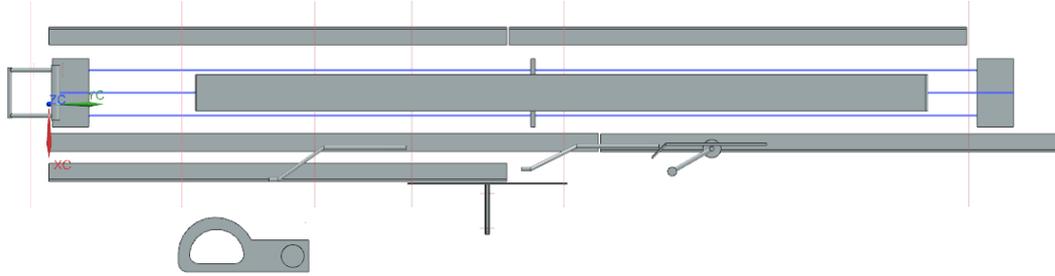
### 5.3.3 SISTEMA DE PALAS

Al ser muy similar a los sistemas de la conformadora, es necesario una fuerza constante y considerable para que el sistema de barras guía sea efectivo. Sin embargo, esta vez no se cuenta con el brazo de succión para arrastrar la caja. Por tanto, se ha optado por un sistema de palas de impulsión, ya que las cintas transportadoras o rodillos pueden dar pie a deslizamientos según las pruebas realizadas con el gemelo digital.

Este sistema consta con cuatro palas, que se mueven de manera simultánea según la trayectoria establecida por las líneas azules de la *figura 26*. Para mejor entendimiento de las trayectorias, se incluye el perfil y la planta de la estación en la *figura 27* y *figura 28*, respectivamente.



*Figura 27. Vista de perfil del modelo CAD de la estación de sellado de tapa*



*Figura 28. Vista de planta del modelo CAD de la estación de sellado de tapa*



## **Capítulo 6. CREACIÓN DEL ENTORNO DIGITAL**

En este capítulo se explicará cómo se ha creado el entorno digital interactivo en el cuál se ejecuta el gemelo digital. Debido a la gran cantidad de componentes que componen la línea de embalaje, se explicará el procedimiento general que se ha seguido para cada paso del proceso, aunque se hará hincapié en situaciones particulares.

Cabe destacar que se empleará la nomenclatura recomendada por los proveedores del software. Esto es el método lowerCamelCase. Con esta codificación, las dos primeras letras indicarán el tipo de elemento al que se está haciendo referencia, en inglés. Por ejemplo “rbPusherLateral” hace referencia al cuerpo rígido, “rigid body” en inglés, asociado al elemento empujador de solapa lateral.

### **6.1 DEFINICIÓN CUERPOS RÍGIDOS**

El primer paso para configurar un entorno digital, al menos en el software NX MCD, es determinar los cuerpos rígidos. Estos cuerpos serán los que se ven afectados por las físicas del programa.

Un cuerpo rígido tiene muchas propiedades en NX MCD, pero por lo general es conveniente dejarlas en su opción predeterminada. Se refleja en la *figura 29* la ventana de opciones que aparece una vez se selecciona el comando de crear sólido rígido.

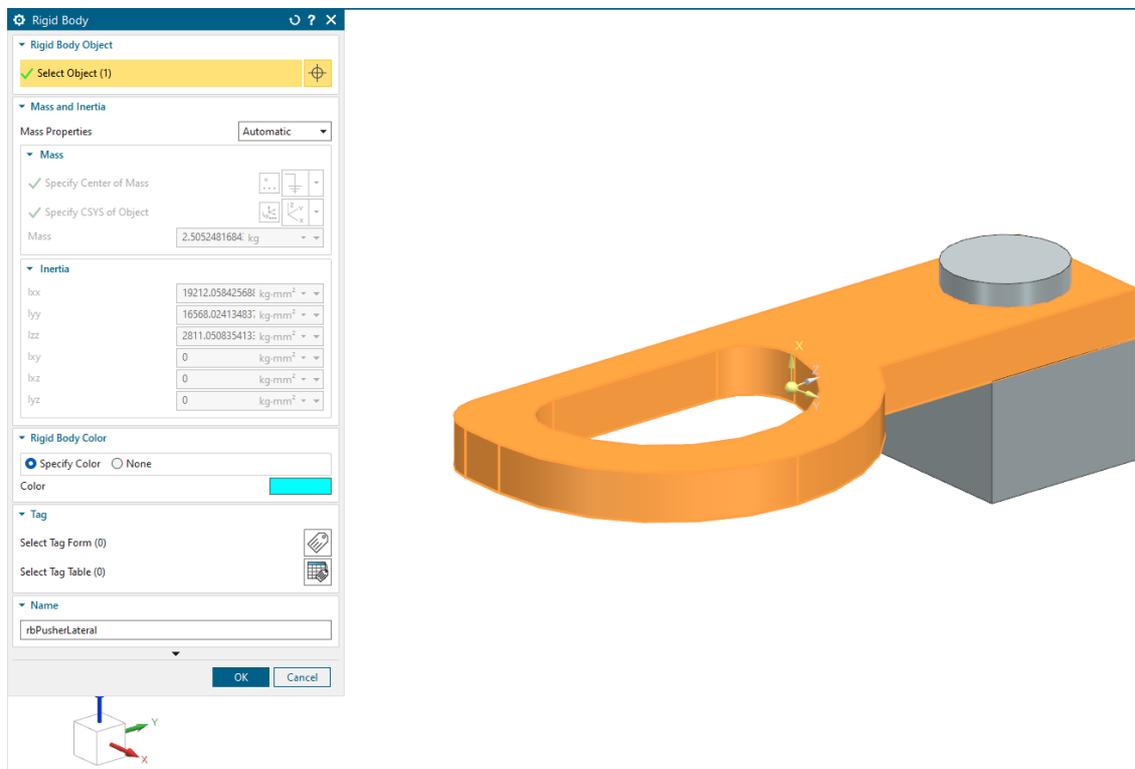


Figura 29. Ventana de selección de propiedades de sólido rígido.

El software NX calcula la masa y la masa inercial asumiendo propiedades homogéneas a lo largo de todo el cuerpo y con una densidad estándar, para no generar fuerzas demasiado elevadas o reducidas. De esta forma, se ahorra en poder de computación y se garantizan las mejores prestaciones para la simulación.

En este proyecto sólo se ha modificado la masa del sólido rígido por dos motivos.

El primero es el caso de la caja. Se ha calculado la masa según la densidad media del cartón, de unos 500 kg/m<sup>3</sup>. Esto se debe a que el peso estándar atribuido por NX hacía la caja demasiado pesada. Esto permitía una simulación más fluida, pero el comportamiento de la caja digital no se identificaba con su contraparte real.

La otra excepción son los cuerpos auxiliares, pequeños cuerpos que sirven como base para otros mayores, permitiendo dos grados de libertad en el movimiento. Por lo general, estos cuerpos tienen un tamaño reducido, por lo no se les atribuye una gran masa automáticamente.

Sin embargo, al fijar a estos cuerpos auxiliares un cuerpo rígido con masa mucho mayor, puede causar inestabilidades en la simulación, al estar soportando un objeto con poca masa grandes fuerzas. Por ello, para evitar esto, se ha aumentado la masa de cuerpos auxiliares a niveles muy superiores con respecto a los cuerpos rígidos dependientes.

## 6.2 DEFINICIÓN DE CUERPOS DE COLISIÓN

Una vez se ha definido un cuerpo rígido, se le puede asociar a este uno o varios cuerpos de colisión. Se puede elegir entre figuras básicas como prismas, cilindros o esferas hasta mallas para definir los límites del cuerpo. Se muestra un ejemplo de cómo se está creando el cuerpo de colisión en la figura 30, en este caso se ha creado con una malla.

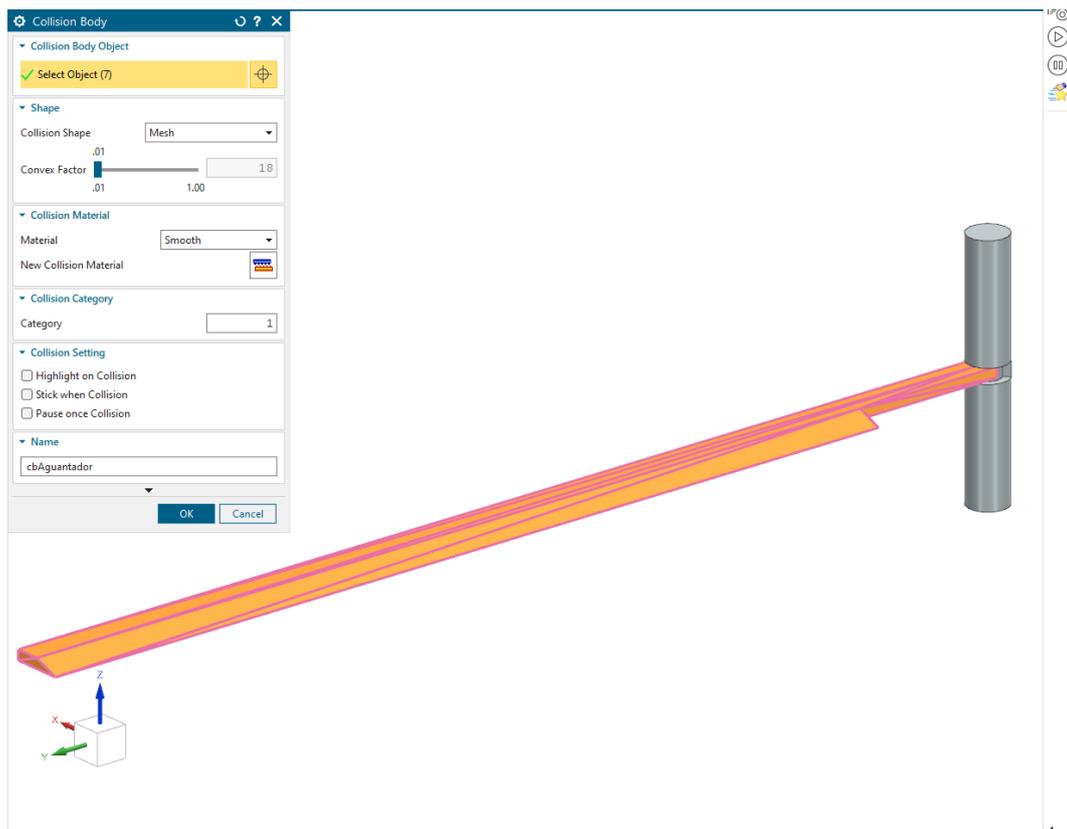


Figura 30. Ventana de selección de propiedades de sólido de colisión.

### **6.2.1 SELECCIÓN DE CARAS Y ARISTAS**

Para crear el cuerpo de colisión, se suele proceder seleccionando las caras o aristas del cuerpo rígido a las que se quiere que afecte la nueva propiedad. El software NX buscará la colocación y tamaño de la forma seleccionada, adaptándola a la selección.

También es posible configurar manualmente el volumen de la zona de colisión, en lugar de que NX lo ajuste automáticamente. En este proyecto no se ha empleado esta funcionalidad, al menos no para cuerpos de colisión, pero sí se empleará y discutirá cuando se hable de sensores de colisión.

Para geometrías más particulares, se puede usar la configuración de cuerpo convexo, como alternativa a la malla. Esta alternativa genera un volumen 3D que mejor se adapte a las caras y aristas seleccionadas, en lugar de la rigidez de la malla que cubre única y exclusivamente la selección. El cuerpo convexo es apropiado para cuerpos cerrados con geometría algo peculiar, ya que consume menos recursos que la malla. Se ha empleado esta opción para el cuerpo de colisión del empujador de producto, como se observa en la *figura 31*.

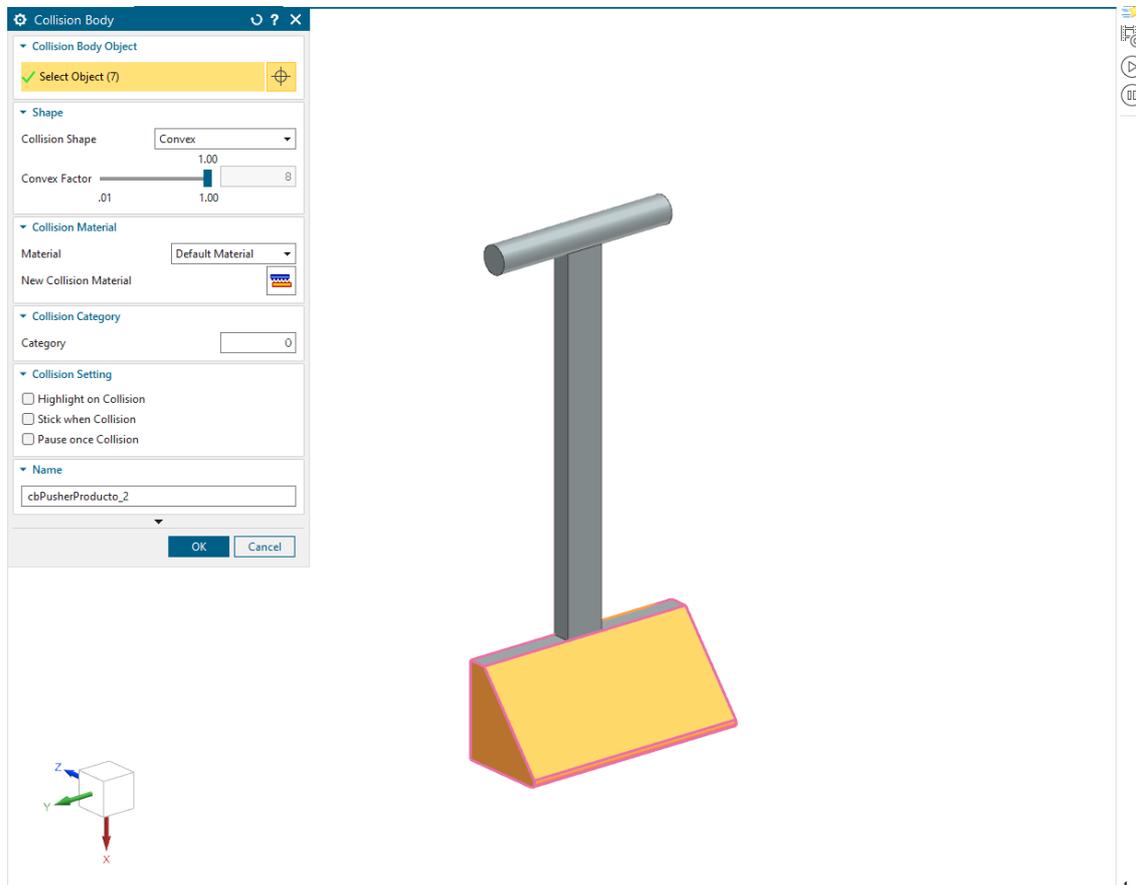
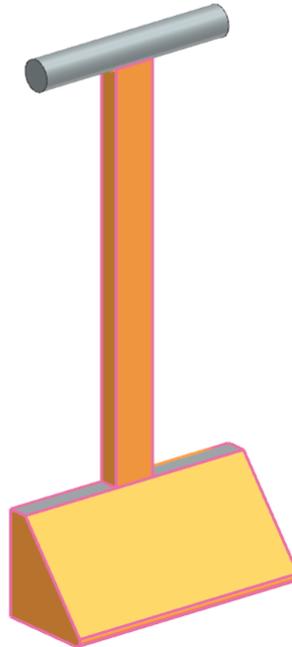


Figura 31. Configuración de cuerpo de colisión para empujador de producto

Como inciso, hay que recalcar que no es necesario marcar la totalidad de un cuerpo rígido como cuerpo de colisión, sino sólo las partes necesarias para la interacción en el entorno digital. En este proyecto, esto se refiere tanto a las partes de las piezas que entrarán en contacto con la caja o producto, como a las partes de la pieza que atravesarán los sensores establecidos como fin de carrera. Finalmente, la totalidad de los cuerpos de colisión del cuerpo rígido para el empujador de producto tendrán la forma reflejada en la *figura 32*: el cuerpo convexo descrito en la *figura 31* y un prisma rectangular.



*Figura 32. Cuerpos de colisión que conforman el empujador de producto*

Expandiendo sobre este último punto, suele ser recomendable dividir el cuerpo rígido en diversos cuerpos de colisión con geometrías sencillas. A pesar de ser más rápido configurar la totalidad del cuerpo con una malla, dividir el cuerpo en varios más simples no sólo implica una menor carga computacional, sino que permite al usuario un mayor control sobre la definición de la superficie. A modo de ejemplo, se introduce la combinación de tres cuerpos de colisión, cilíndricos, que componen las barras guías de solapas en la *figura 33*.

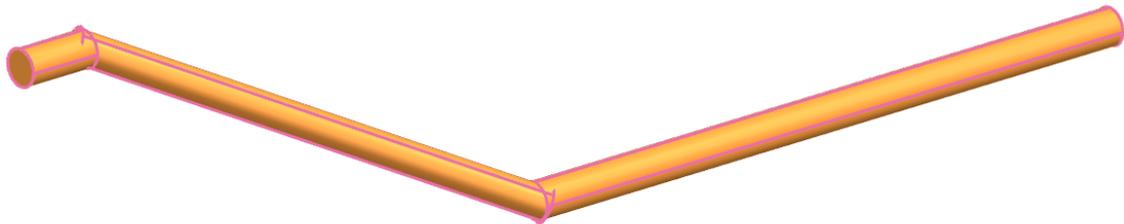


Figura 33. Conjunto de cuerpos de colisión de barra guía de solapas

## 6.2.2 MATERIAL DEL CUERPO DE COLISIÓN

El material del cuerpo de colisión tiene que ver, sobre todo, con los factores de fricción del cuerpo sobre otros, como se puede observar en la *figura 34*.

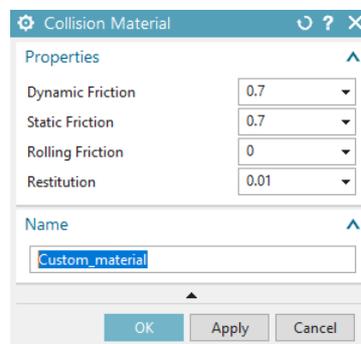


Figura 34. Opciones de propiedades para nuevos materiales de cuerpo de colisión (Siemens, s.f.)

Para este proyecto, se ha preferido dejar el material por defecto en la mayoría de los casos, ya que garantiza un comportamiento adecuado en el entorno digital. Sí que se ha optado por cambiar el factor de fricción a uno nulo en elementos sobre los que se desliza la caja o que deslicen sobre ella. En concreto, se cambia el factor de fricción de las guías de las solapas y del aguantador, como se evidencia en la figura por el nuevo material, denominado “smooth”.

### **6.2.3 CATEGORÍA DE COLISIÓN**

La categoría de colisión jugará un papel crucial en la zona de sellado, que se explicará posteriormente. La categoría de colisión determina con qué otros cuerpos rígidos podrán interactuar el que se esté configurando.

Más concretamente, un cuerpo de colisión sólo podrá tocar e interactuar con otros de la misma categoría o de la categoría por defecto “0”. Es decir, un cuerpo de categoría 0 puede interactuar con cualquier otro, mientras que otro de categoría “1” solo podrá interactuar con cuerpos “1” o “0”.

## **6.3 DEFINICIÓN DE JUNTAS Y RESTRICCIONES**

Una vez definidos los cuerpos rígidos, se puede fijar o restringir sus movimientos respecto al espacio o respecto a otro sólido rígido.

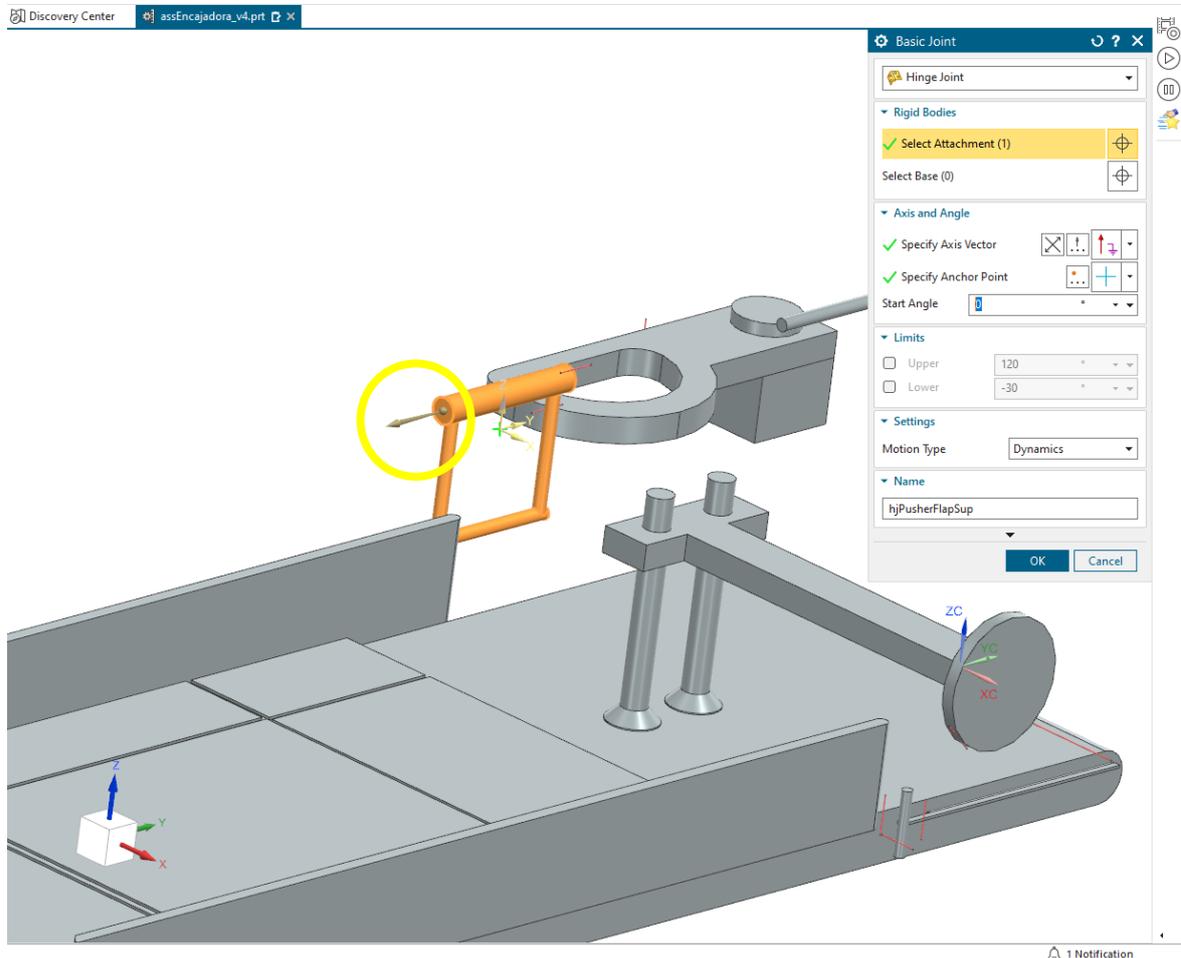
En el proyecto se han usado cuatro tipos de juntas, además de la funcionalidad de amortiguador con resorte en algunos puntos clave.

### **6.3.1 JUNTAS FIJAS**

Tal como su nombre indica, las juntas fijas restringen los movimientos del cuerpo rígido en cuestión, resultando en cero grados de libertad. Esta inmovilización puede ser respecto del espacio o relativa a otro sólido rígido. De esta última manera, si la base se mueve, el sólido acoplado lo acompañe gracias a la junta fija.

### **6.3.2 JUNTAS ACHARNELADAS**

Estas juntas permiten el movimiento de la pieza entorno a un eje marcado por el usuario. Es el más empleado en el modelo, debido a que este movimiento abunda entre los accionamientos sencillos elegidos para la línea de embalaje.

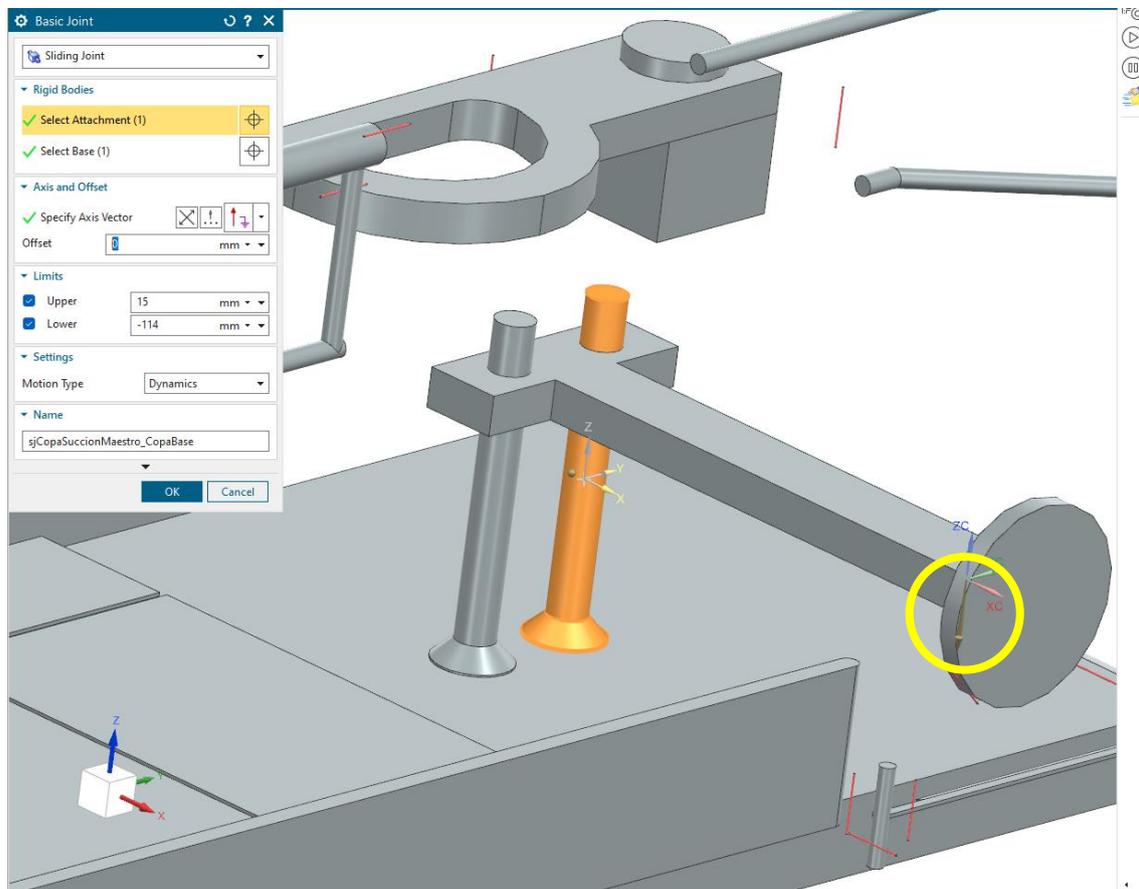


*Figura 35. Junta acharnelada del empujador de solapa superior con eje de giro resaltado*

En la *figura 35* se pueden observar algunas de las opciones de una junta. Se observa el eje de giro del empujador, redondeado en la *figura 35*, determinado por un vector y un punto en el espacio. En este caso, al no haberse elegido ninguna base, este punto y vector se tomarán respecto al sistema de referencia global del modelo.

### 6.3.3 JUNTAS DESLIZANTES

Las juntas deslizantes permiten al cuerpo sólido libertad de movimiento una línea recta. Es especialmente útil para el modelado de pistones y deslizaderas, como su nombre indica.



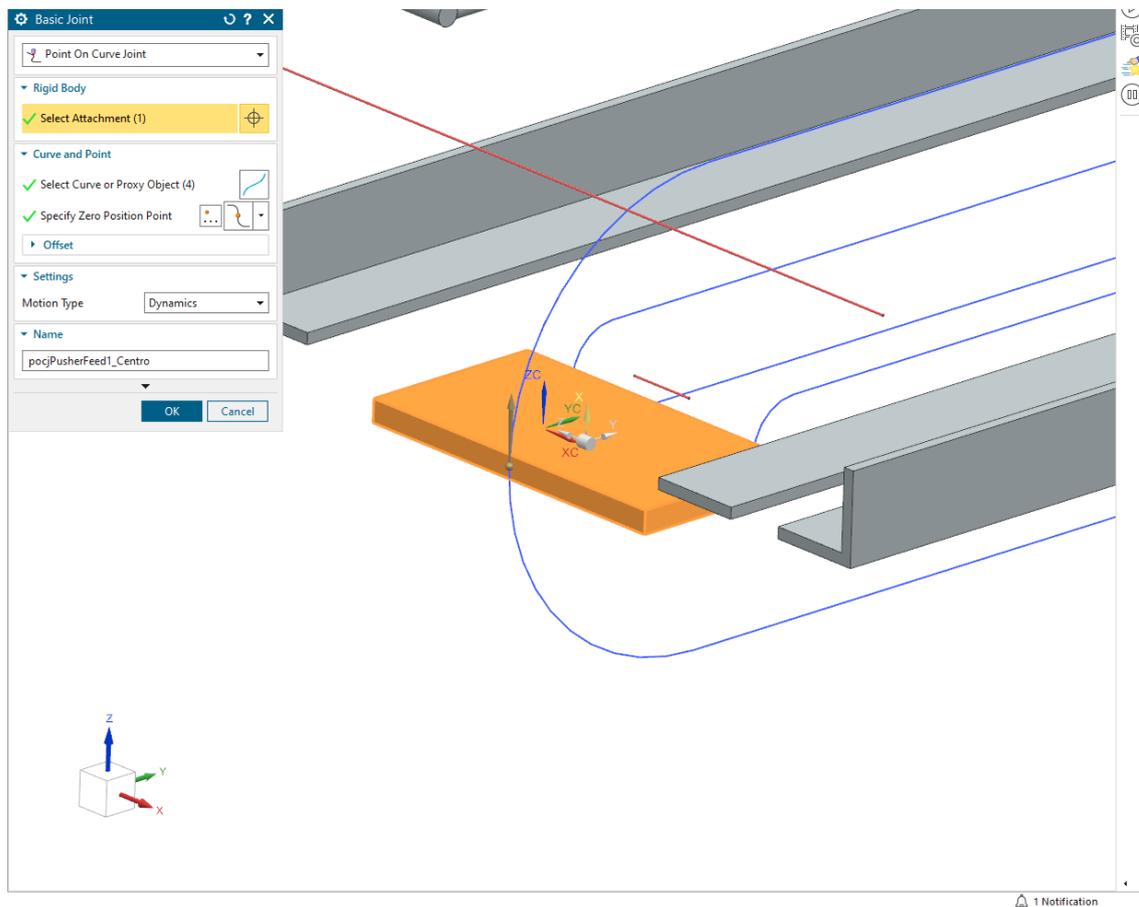
*Figura 36. Junta deslizante de vástago de copa de succión con respecto a su base*

En la figura 36 se puede observar cómo se ha configurado la junta deslizante de la copa de succión sobre su base. En concreto, su movimiento viene descrito por el vector rodeado en amarillo. Como se puede apreciar, el vector no está siguiendo la trayectoria del vástago, sino en el centro de coordenadas de la pieza base. Como sólo se requiere la dirección del vector para definir esta junta, se define por defecto de esta manera.

Destacan también la configuración de los límites de la junta y el offset inicial. En la mayoría de las juntas del gemelo, se ha optado por imponer límites por encima del comportamiento esperado en la ejecución. De esta forma, en el futuro, se abre la posibilidad de introducir en el entorno digital condiciones de ruptura o daños en las juntas.

### 6.3.4 JUNTAS DE PUNTO SOBRE CURVA

Se emplea una junta más particular para el sistema de palas de la estación selladora de tapas. En concreto, se emplea la junta de tipo punto sobre curva. Se puede ver su configuración en la *figura 37*, en la que se recoge la configuración de la pala sobre la trayectoria central exterior.



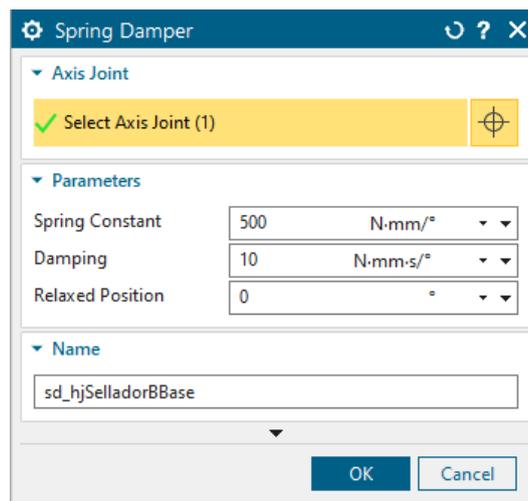
*Figura 37. Configuración de junta de tipo punto sobre curva*

Su funcionalidad se explica por sí misma. El punto del sólido rígido que esté en contacto con la curva podrá deslizarse libremente sobre la misma, pero sus movimientos quedan restringidos de modo que se mantenga el contacto en todo momento. Esto implica que, para impedir que el sólido rote sobre sí mismo mientras siga la trayectoria, es necesario indicar al menos tres puntos del sólido en tres trayectorias paralelas. Si fuesen solamente dos curvas

paralelas, se estaría dando libertad al sólido para girar sobre el eje que une los puntos de contacto.

### 6.3.5 FUNCIÓN DE AMORTIGUADOR DE RESORTE

Las juntas acharneladas y las juntas deslizantes admiten la funcionalidad de amortiguador con resorte. Este tipo especial de junta sólo se puede aplicar sobre una ya existente. Funciona igual que un muelle convencional, cuanto más se haya desplazado el sólido respecto a su punto original, más fuerza hará el resorte para devolverlo a su posición original. Se usarán en este proyecto para los vástagos de las copas de succión y los mecanismos de la selladora, la configuración de estos últimos se recoge en la *figura 38*.



*Figura 38. Configuración de amortiguador de resorte para el mecanismo de sellado*

Se observa que los posibles parámetros son los propios de un muelle al uso, en concreto la constante de elasticidad, el factor de amortiguamiento y la posición neutra.

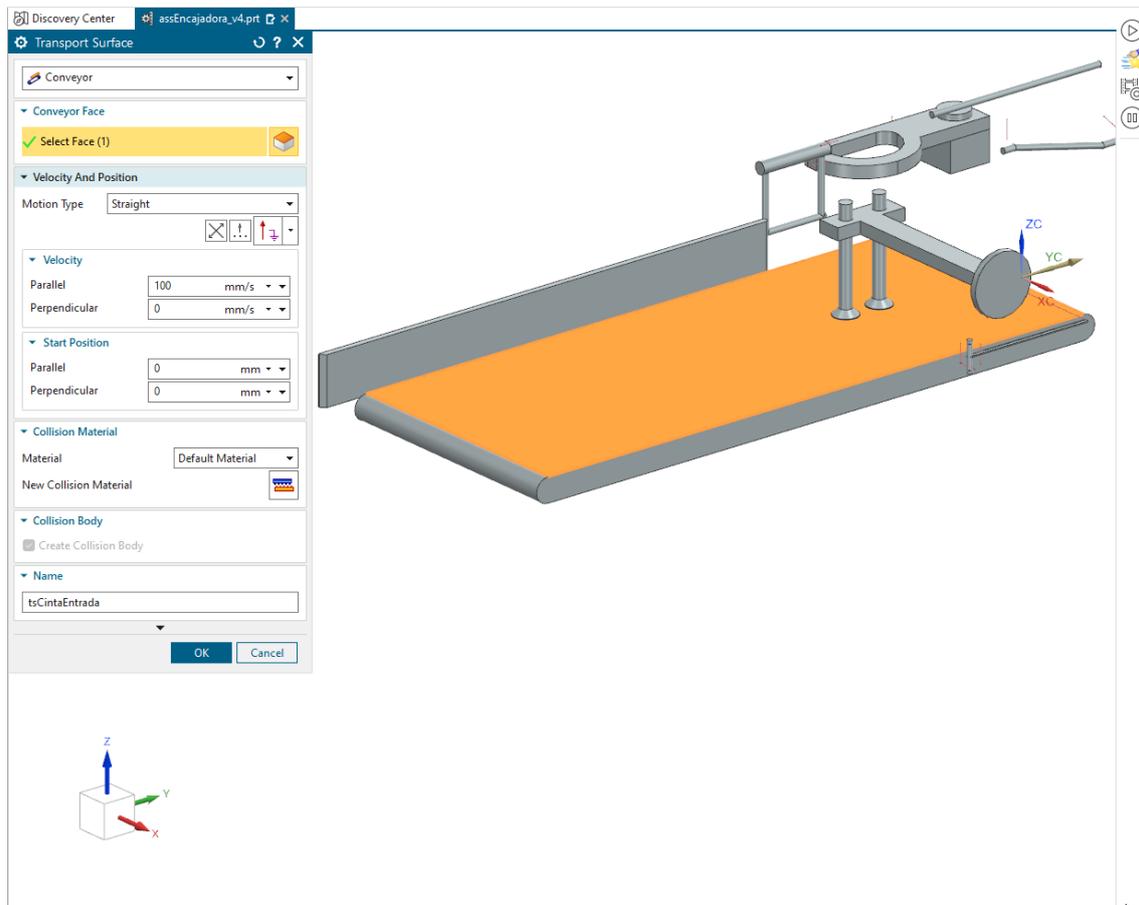
## 6.4 DEFINICIÓN DE ACTUADORES

Una vez se han definido las juntas, se deben preparar los medios mediante los cuales el sistema de control podrá interactuar con la simulación. Se han empleado tres tipos de actuadores, su diferencia radicando en cómo han sido definidos en el software del entorno

digital. El tercer tipo, el accionamiento de la copa de succión se explicará en un apartado posterior, por requerir manipular las señales con el adaptador de señales.

### 6.4.1 SUPERFICIES DE TRANSPORTE

Las superficies de transporte son uno de los medios más sencillos y con menor consumo de recursos para aplicar velocidades a cuerpos sólidos. Hay varios tipos de superficie de transporte dependiendo del cuerpo de colisión sobre el que se aplique, o incluso conjunto de cuerpos. Para este proyecto basta con emplear la opción de “cinta”, como se representa en la *figura 39*.



*Figura 39. Superficie de transporte como cinta transportadora, con parámetros*

Una vez definida la cara del cuerpo de colisión que se va a convertir en cinta transportadora, se define la dirección en la que ésta moverá a los cuerpos que estén sobre ella, así como la velocidad.

Este método presenta una desventaja importante, al menos en este caso específico. En el entorno digital de NX, la cinta transportadora sólo atribuye velocidad a los cuerpos en contacto con la misma. Sin embargo, si el objeto en cuestión es muy ligero, es muy probable que cualquier choque o perturbación eleve el cuerpo ligeramente, dejándolo inmóvil. Es por esto que las zonas con especial interacción con barras guías se utilizan medios de impulsión alternativos, como el brazo de succión o las palas impulsoras.

#### **6.4.2 CONTROLADORES DE VELOCIDAD**

Los controladores de velocidad se pueden definir como una fuerza externa sobre una junta, cuyo valor y sentido cambiará según sea necesario para alcanzar cierta velocidad especificada. En juntas cuyo movimiento permitido sea angular, se estará hablando de un momento angular en lugar de fuerza, así como velocidad angular en lugar de lineal.

Todos los accionamientos bidireccionales del gemelo digital se modelan con controladores de velocidad. En concreto, es necesario emplear tres: velocidad positiva, velocidad negativa y velocidad nula. El sentido de la velocidad vendrá dado por el vector elegido a la hora de definir la junta. Es importante también contar con un controlador de velocidad que mantenga la velocidad nula en caso de que no haya orden de movimiento, en especial en accionamientos que se mueven a favor y en contra de la gravedad. Se incluye un ejemplo de éstos últimos en la *figura 40*, concretamente del empujador de producto:

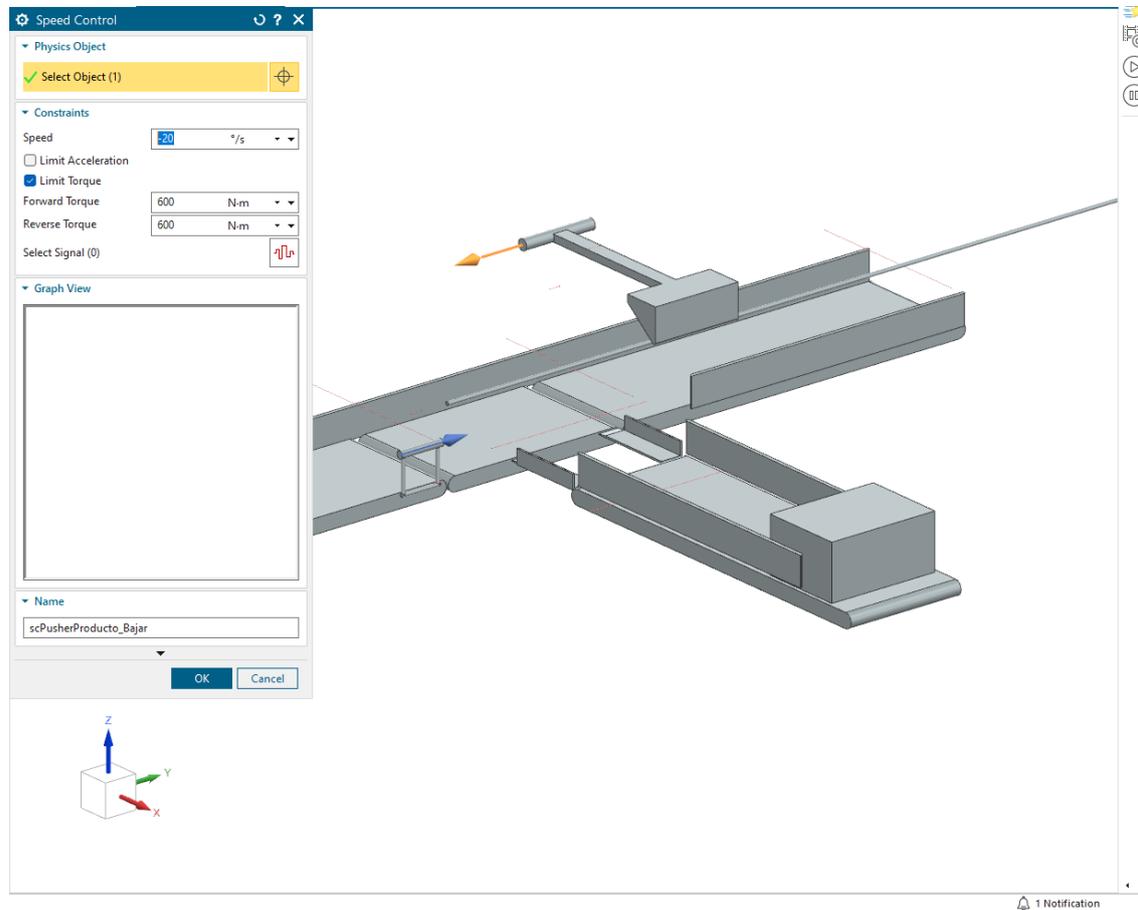


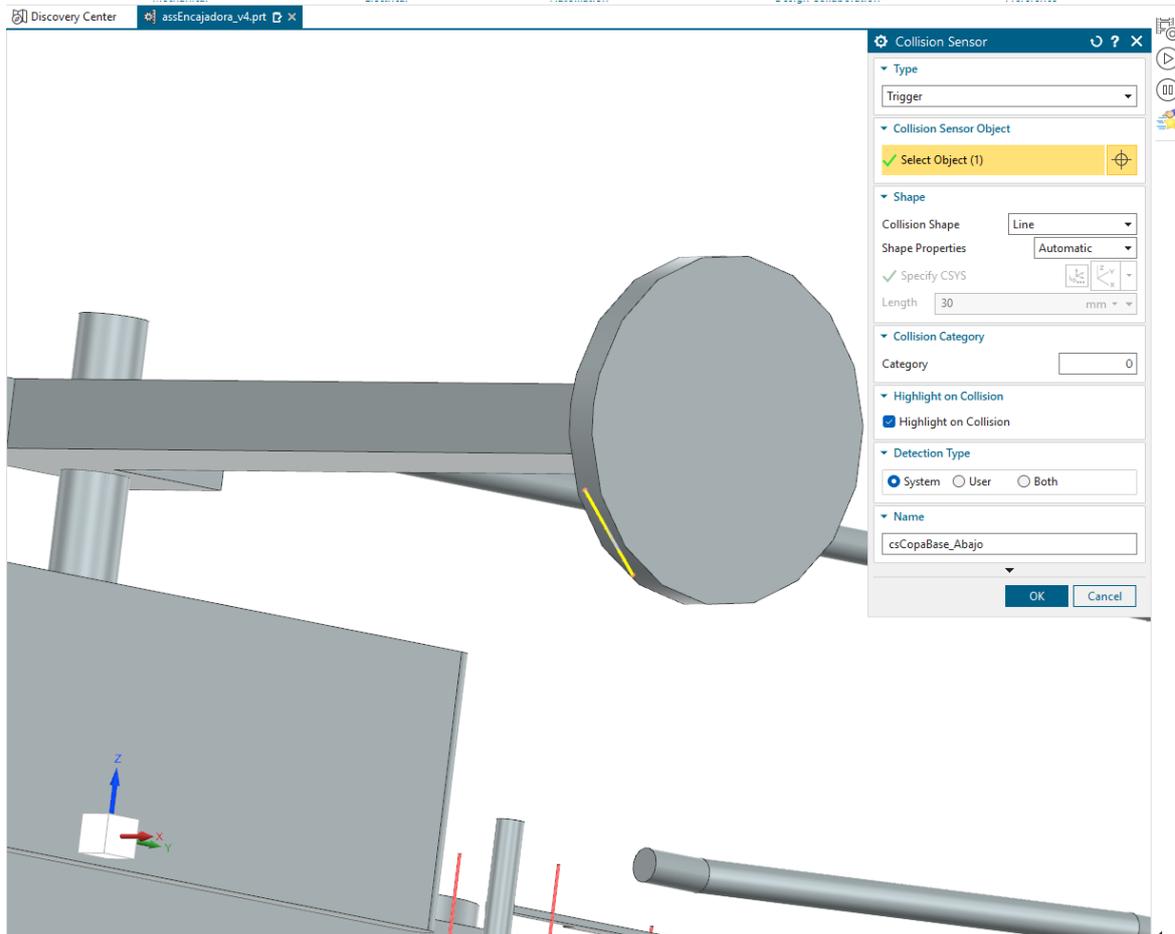
Figura 40. Parámetros de controlador de velocidad de bajada para empujador de producto

Entre los parámetros de la figura 40, destacar la existencia de la opción “Limitar torque”, o “Limitar fuerza” si se tratase de una junta con movimiento rectilíneo. No es estrictamente necesario, pero es recomendable limitar la fuerza a un valor razonable. De lo contrario, es muy posible encontrarse con problemas de inestabilidad o “clipping”. Esto último es especialmente cierto para cuerpos que pueden entrar en contacto con otros con una junta fija. Es por esto que el uso de esta funcionalidad puede evitar situaciones imposibles e insetables.

## 6.5 DEFINICIÓN DE SENSORES

Se configuran ahora los sensores de posición y de fin de carrera que transmitirán la información al sistema de control. Destaca que, para configurarse como sensor de colisión, no es necesario haber declarado la pieza como cuerpo rígido, siendo uno de los pocos

sistemas del entorno digital que funcionan sin masa. Se incluye en la *figura 41* un ejemplo de los muchos sensores de fin de carrera empleados.



*Figura 41. Sensor de colisión para fin de carrera de base de brazo de succión, en posición de brazo bajado*

Es necesario controlar bien la nomenclatura para la posterior identificación, ya que el número de sensores en gemelos digitales tiende a ser muy elevado. Se aprecia que los parámetros son similares a los de los cuerpos de colisión. Las formas disponibles son las mismas, con la adición de la forma de colisión “línea”. El sensor se considerará activado, o “triggered”, cuando un cuerpo de colisión de categoría compatible atraviesa el área o línea marcado como sensor, activando una señal que podrá ser tratada en el adaptador de señales.

## 6.6 DEFINICIÓN DE ZONAS DE INTERACCIÓN

Se denomina zona de interacción a aquellas que pueden cambiar las propiedades de los cuerpos rígidos una vez a comenzado la ejecución del gemelo digital.

### 6.6.1 COPA DE SUCCIÓN

La copa de succión se ha implementado mediante el uso de la herramienta “Gripper”. Esta herramienta permite elegir entre gripper por pinza o gripper por ventosa, siendo este último caso el escogido para el brazo de succión. En primer lugar, se debe seleccionar el cuerpo rígido al que la zona de agarre estará asociada. Debido a que se ha modelado el brazo con dos copas de succión. Se debe seleccionar una como maestra, que será la que realmente tenga la funcionalidad de agarrar. Se marca en la *figura 42* el vástago de la copa de succión seleccionado, así como los parámetros de la zona de agarre.

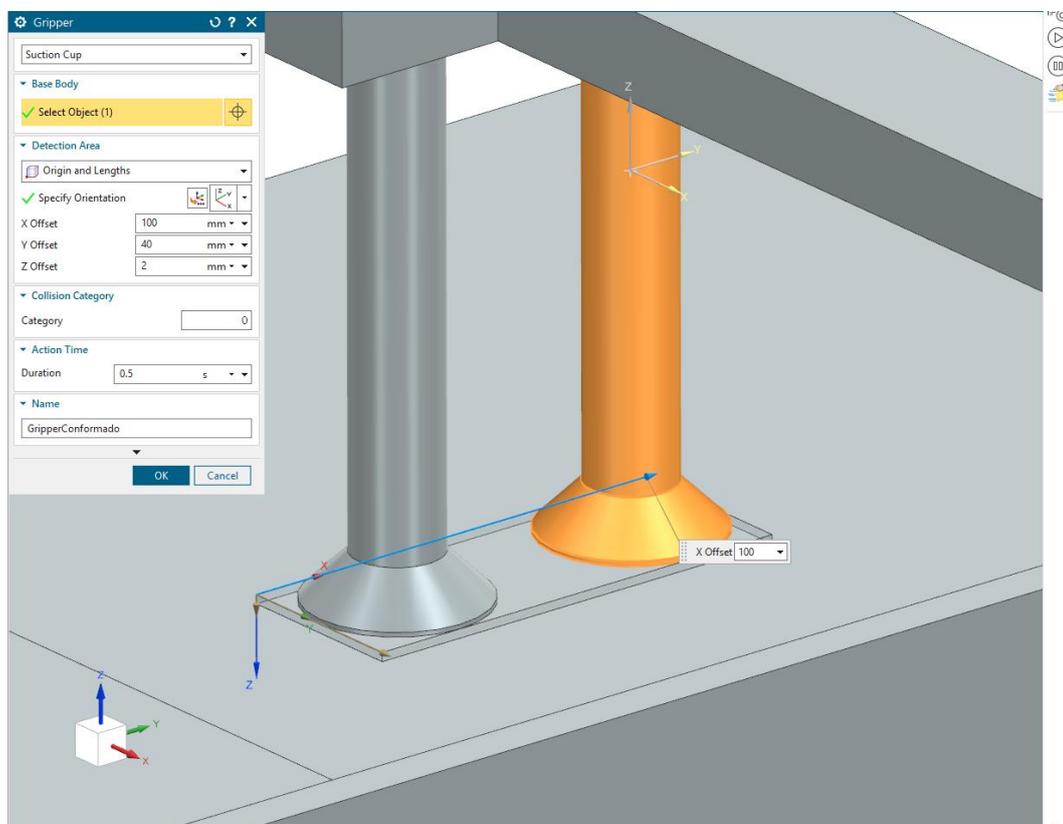


Figura 42. Zona de agarre de copa de succión y parámetros

En la *figura 42* anterior se observa que la zona se delimita mediante un prisma. Cualquier cuerpo de colisión de categoría compatible con parte dentro de la zona una vez haya pasado el tiempo de activación, 0'5 segundos en este caso, quedará “fundido” con el vástago de la copa de succión, convirtiéndose de manera temporal en un único cuerpo rígido resultante de la combinación. El control de la copa de succión sólo se puede hacer a través de señales, en la *figura 51* más adelante se muestra cuáles específicamente.

### **6.6.2 ZONA DE UNIÓN**

La zona de unión es similar a la herramienta de “gripper” descrita anteriormente, sólo que sus efectos son permanentes. Una vez se cumplan las condiciones especificadas, todos los elementos de categoría de colisión compatible quedan unidos en un único cuerpo rígido, combinándose sus cuerpos de colisión y actualizando su centro de masas. Esto es especialmente útil cuando ciertos objetos se deben comportar como uno solo a partir de algún punto de la ejecución del gemelo, ya que reducir el número de cuerpos rígidos mejora el rendimiento. Hay dos tipos principales de condiciones para activar una zona de unión. En la *figura 43* se representa la zona de unión empleada durante la fase de llenado para unir la base de la caja y el producto, con condición de activación por colisión.

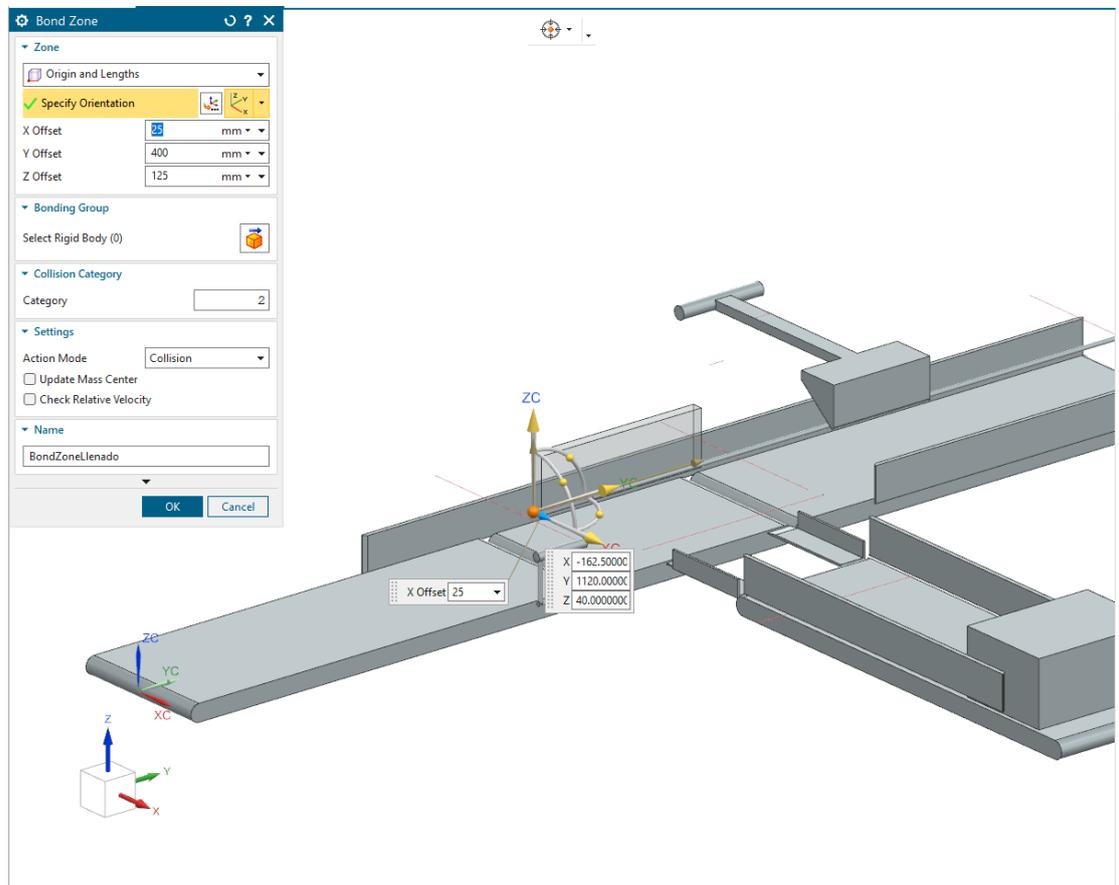


Figura 43. Zona de unión entre caja y producto en fase de llenado

En una zona de unión activada por colisión, los cuerpos que entren en contacto dentro de la zona y que sean de categoría compatible quedarán unidos. Por esto, se configura la zona para que sólo envuelva la zona en la que entrarán en contacto las bandejas de producto y la base sellada de la caja. Además, como medida de precaución adicional, se ha cambiado la categoría de colisión de las barreras, cintas y empujadores involucrados en el proceso a categoría de colisión “1”, de modo que no quedarían unidos incluso en el caso de entrar en contacto con otro cuerpo dentro de la zona de unión.

En la *figura 44* se muestra el otro tipo de zona de unión empleado en el proyecto, en concreto para modelar el sellado de la base y tapa de la caja. Se emplea el modo de activación definido por el usuario.

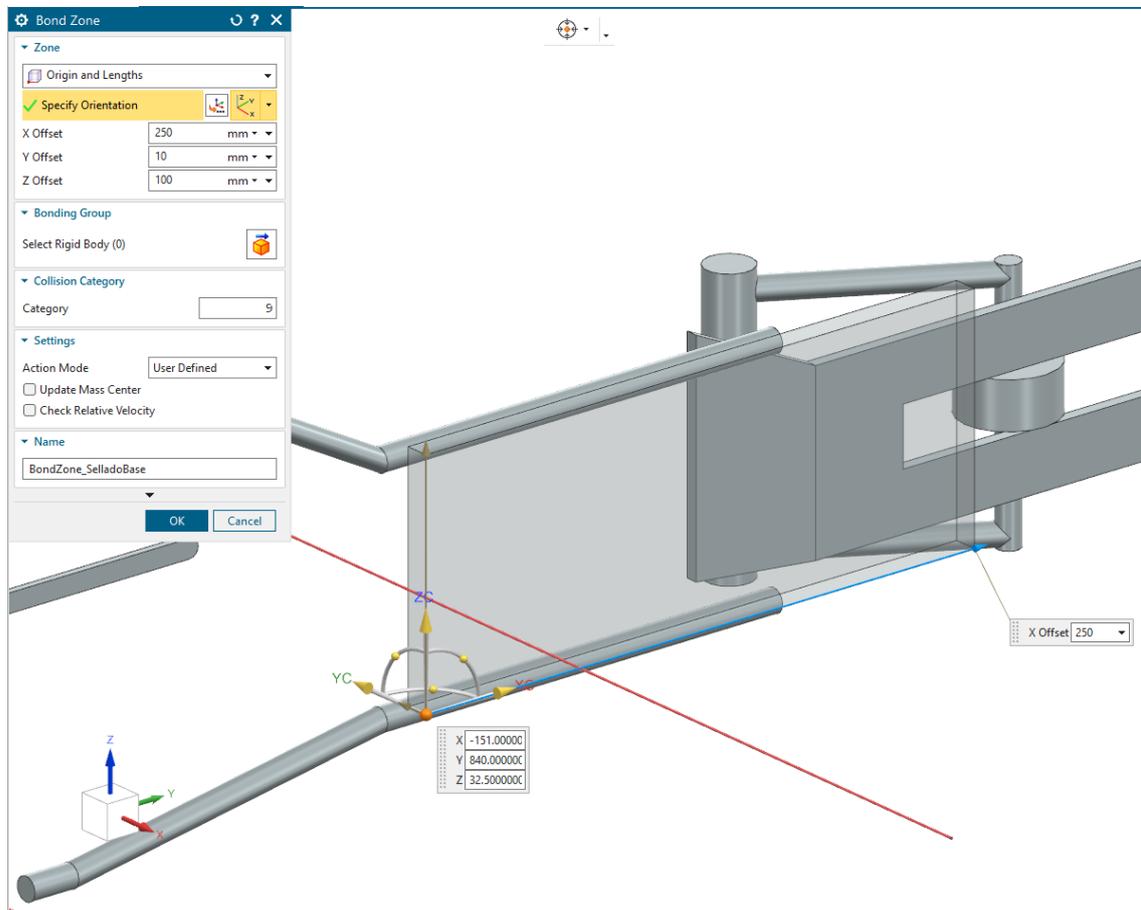
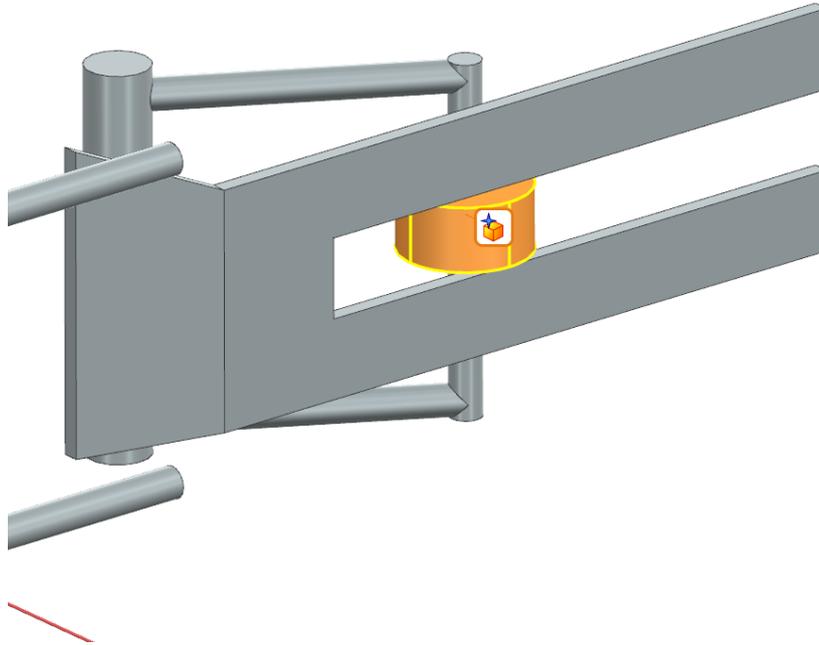


Figura 44. Zona de unión para selladora, con activación definida por el usuario

De manera similar a la anterior zona de unión, se selecciona una categoría de colisión distinta a los componentes cercanos, de manera que sólo la caja de categoría “0” se vea afectada por la unión. Se busca que la caja quede sellada una vez el rodillo modelando el dispensador de cinta entre en contacto con la base conformada. Debido a que se ha seleccionado “activación definida por el usuario” esto se debe realizar a través de la manipulación de señales. Se crea, por tanto, un sensor de colisión asociado al rodillo, de forma cilíndrica y tamaño ligeramente superior al del rodillo en sí, como se observa en la *figura 45*.



*Figura 45. Sensor de colisión para trigger de sellado*

Una vez definidos todos los componentes, se debe crear un adaptador de señales. Se explica qué es una señal con más detalle en el *apartado 6.8*. En el adaptador de señales se controlan tanto la señal de activación de la zona de unión, que es un input para el sistema, como el estado “triggered” del sensor de colisión, output para el sistema. Se vinculan ambos, de manera que cuando se detecte colisión con el rodillo dispensador de cinta, se active la zona de unión y selle la base de la caja. Se muestra el adaptador de señales concreto en la *figura 46*.

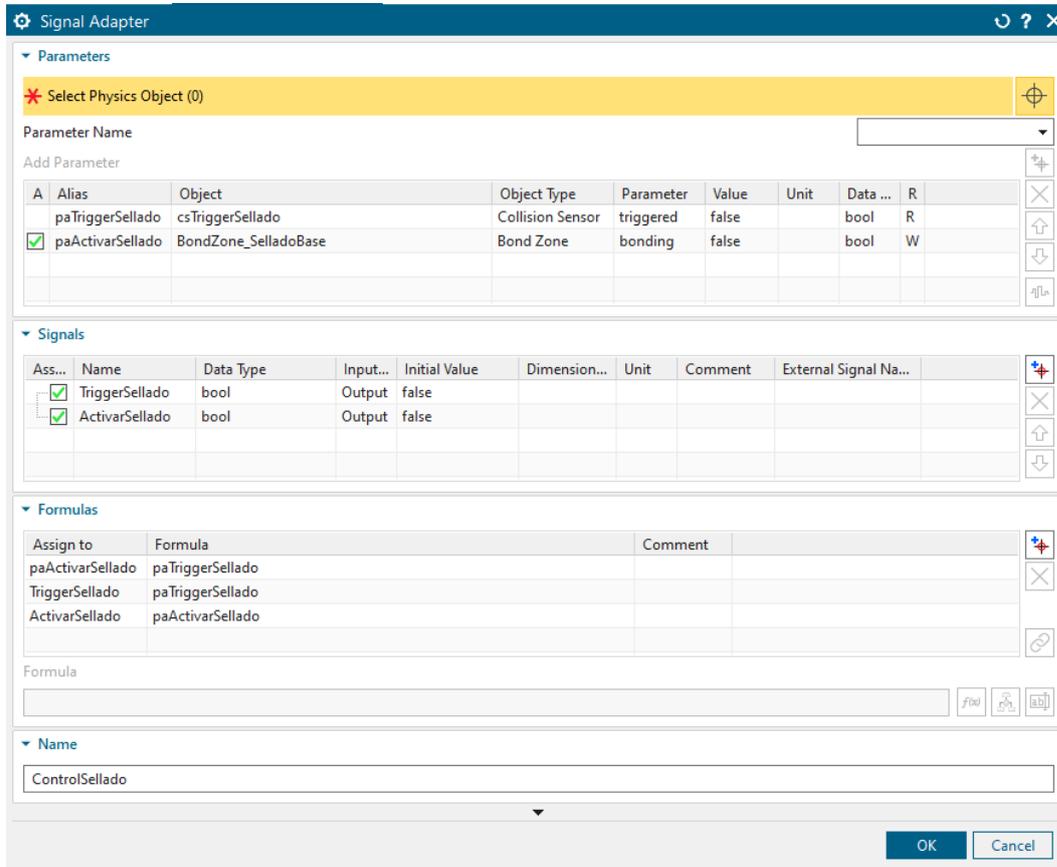
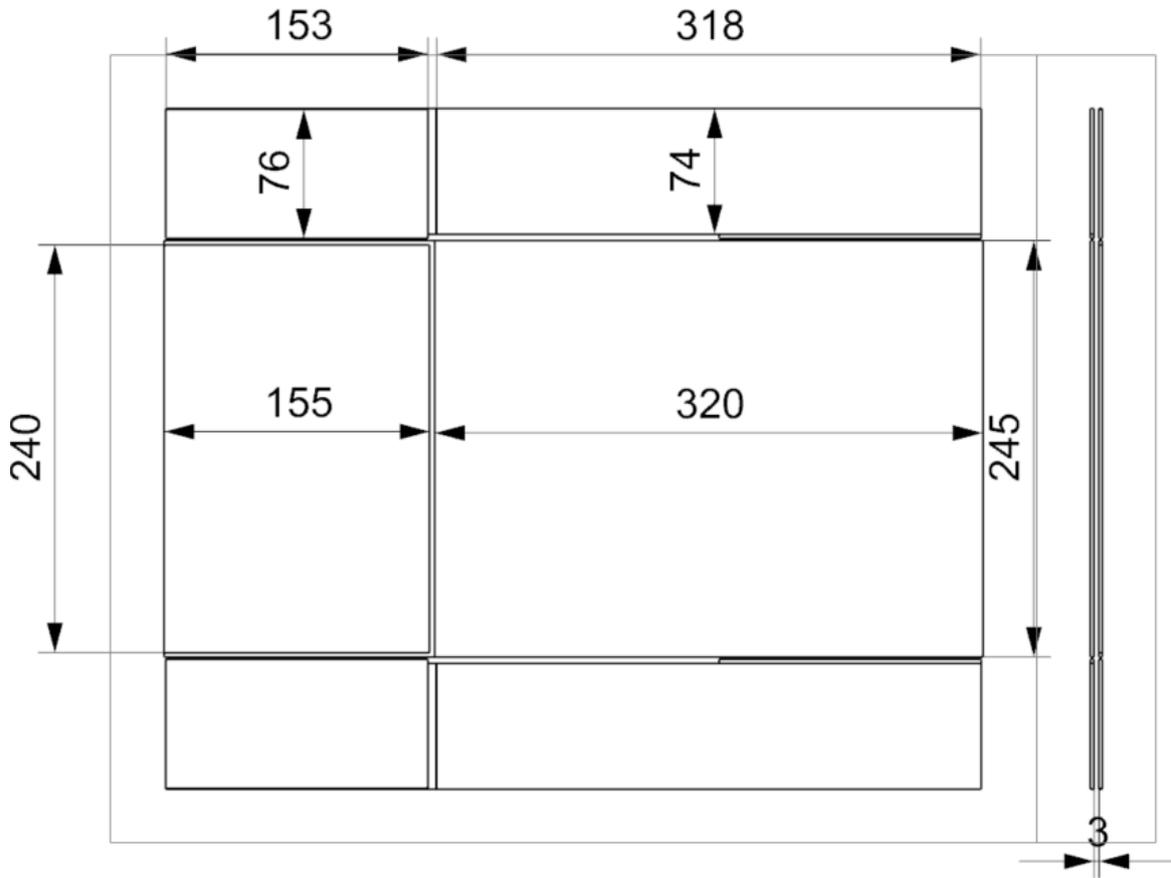


Figura 46. Adaptador de señales para el control de sellado

## 6.7 MODELADO Y DISEÑO CAJA

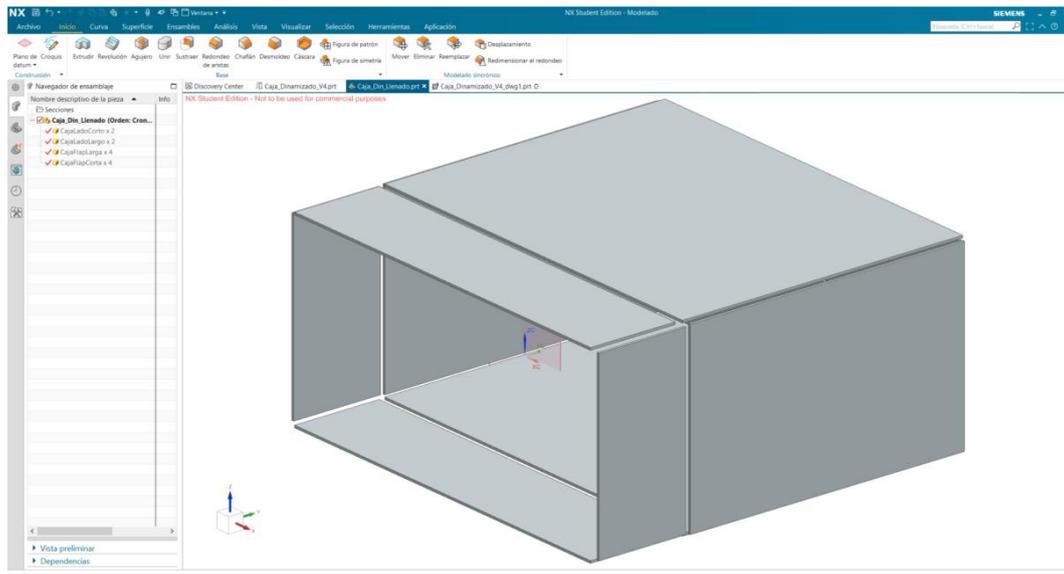
### 6.7.1 MODELADO Y DIMENSIONES

Se modela la caja según un modelo estándar de 320x245x155 mm una vez conformada. Para su modelado, se ha dejado espacios de 3mm entre las paredes y solapas de la caja. También se ha hecho a las solapas cortas situarse ligeramente más cerca del centro que las solapas largas, de manera que se puedan cerrar unas sobre otras sin problemas. Se ha establecido que el grosor del cartón será de 2mm, de acuerdo con las medidas dadas por el fabricante (Arapack, s.f.). Se aprecian las dimensiones más relevantes en el plano de la caja plegada de la figura 47.



*Figura 47. Dimensiones de la caja plegada*

Una vez conformada la base, la caja se verá cómo se indica en la *figura 48*.



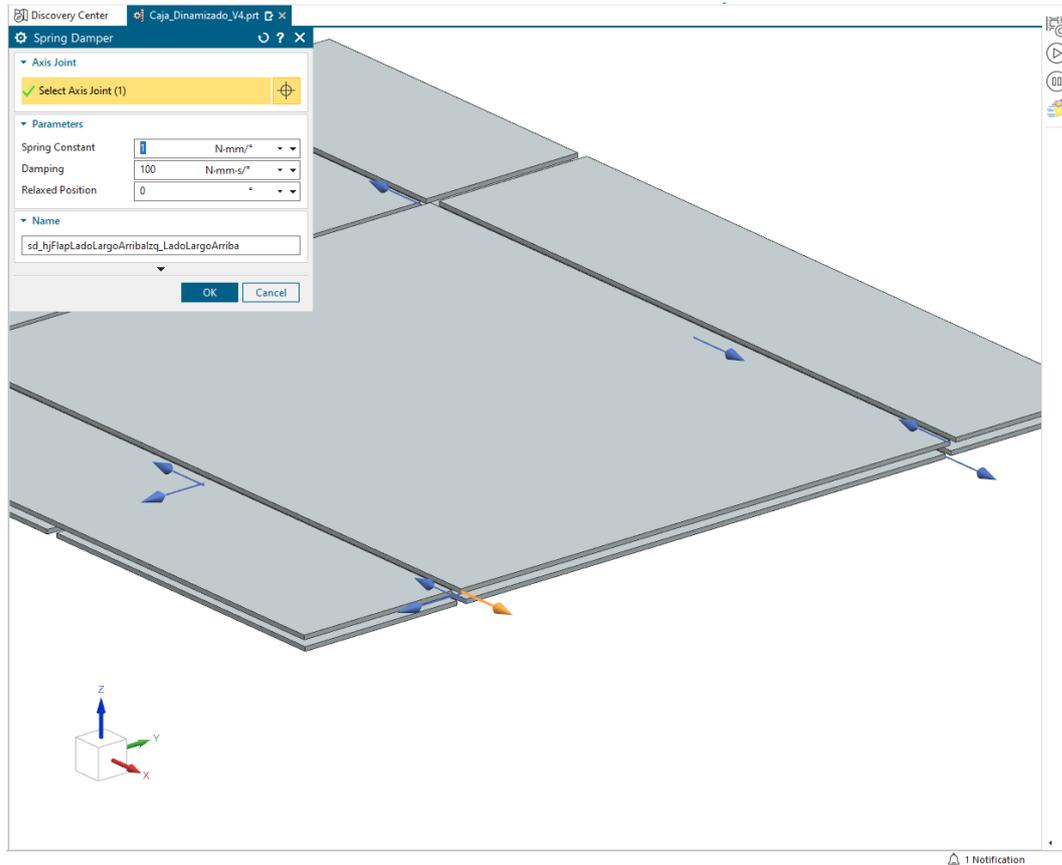
*Figura 48. Modelo CAD de la caja con base conformada*

## 6.7.2 JUNTAS Y DINAMIZADO

Una vez diseñado el modelo de la caja, se debe integrar en el entorno digital. Es importante realizar este paso en un ensamble aparte, para poder generar el modelo dinamizado de la caja directamente en la línea. Se va a declarar como cuerpo rígido separado a cada pared y solapa de la caja.

Después se debe establecer una junta acharnelada en cada uno de los dobleces de la caja. Se hará que el eje se sitúe en el límite del lado largo, en caso de uniones entre las paredes larga y corta de la caja, y en el límite de la pared en cuestión en el caso de las solapas. Para modelar que el cartón no es totalmente plástico, se van a emplear amortiguadores con resorte en todas las juntas de la caja, de modo que tengan cierta capacidad de resistencia a las deformaciones.

En la *figura 49* se muestran los ejes de algunas de las juntas, así como los parámetros de los resortes empleados.



*Figura 49. Ejes de la caja y parámetros de resortes para modelar resistencia del material*

Finalmente, el modelo dinamizado de la caja plegada, junto con un listado de los cuerpos rígidos y juntas empleados, son recogidos en la *figura 50*.

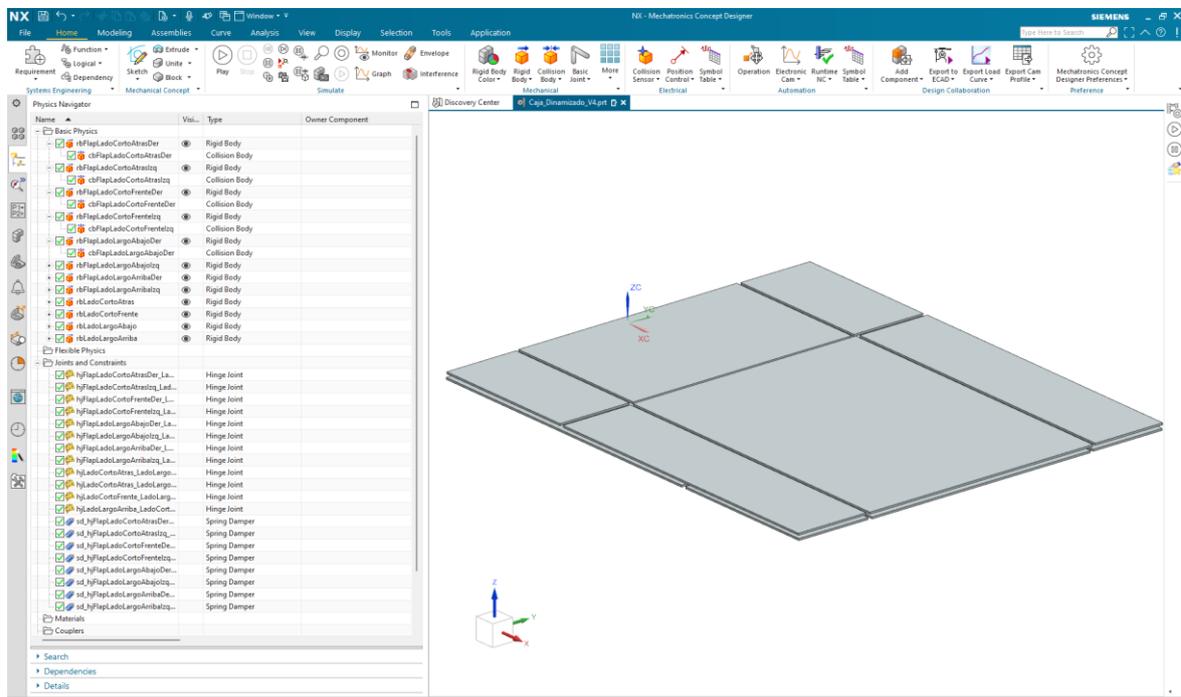


Figura 50. Modelo dinámico final de la caja plegada

## 6.8 AGRUPACIÓN DE SEÑALES PARA COMUNICACIÓN EXTERNA

Todos los elementos creados hasta hora en el entorno digital tienen asociadas una o varios parámetros, funcionando internamente sin el conocimiento del usuario. Sin embargo, para hacer interacciones más complejas como la activación del sellado o comunicaciones externas, es necesario manipular dichos parámetros internos.

En concreto, además de los relacionados con la copa de succión, es necesario tratar los parámetros de activo de los controles de velocidad (input) y el de “triggered” de los sensores (output). Para poder tratarlos, se generará una señal asociada a cada parámetro mediante la herramienta de adaptador de señales. Se recoge el principio de la lista de señales y parámetros de la estación encajadora en la figura 51.

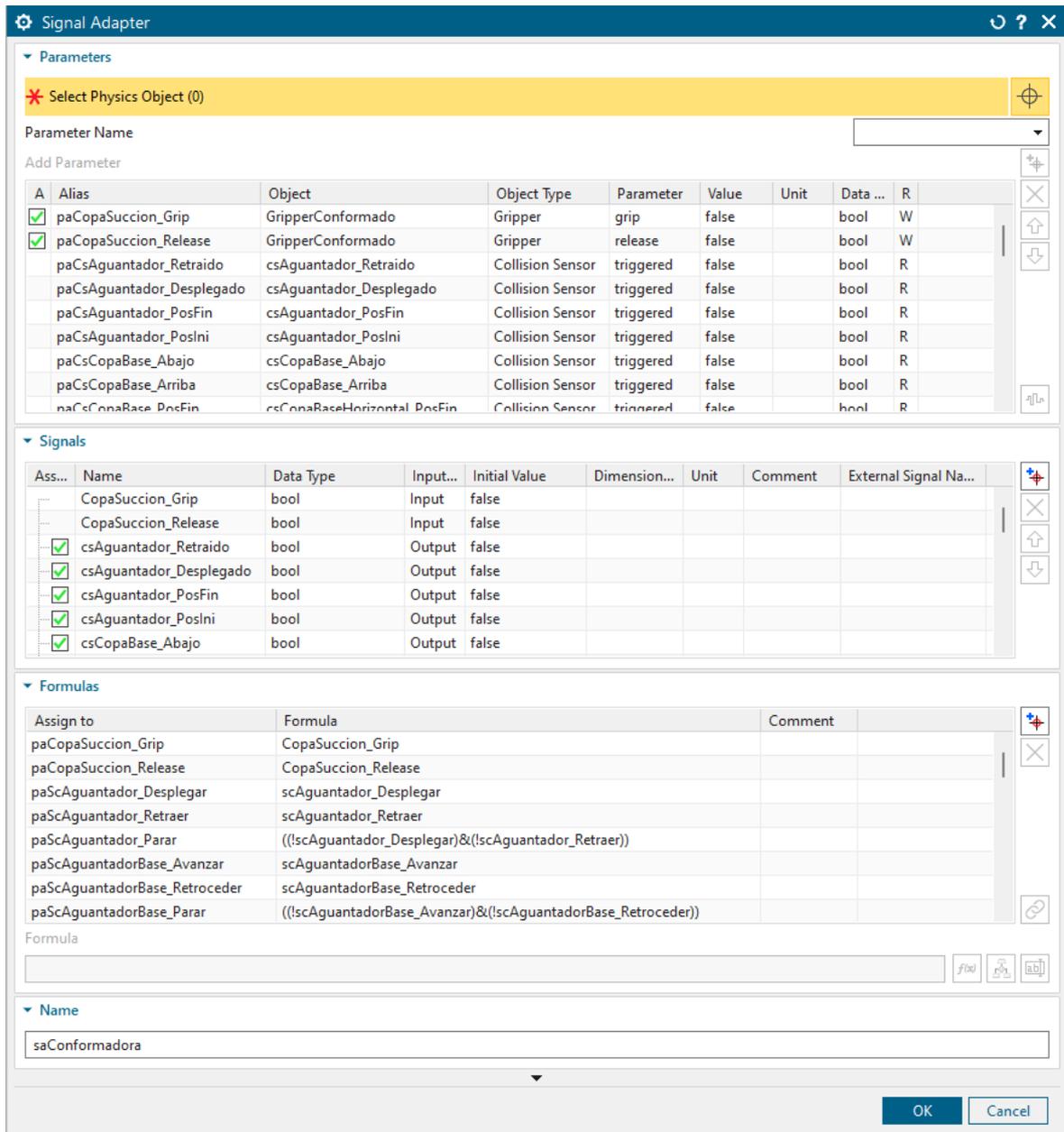


Figura 51. Adaptador de señales de la estación encajadora

Estas señales se pueden transmitir fácilmente hasta el controlador externo, gracias a que las comunicaciones están integradas en los programas al ser todos de la familia Siemens. Sí hay que tener cuidado de que los nombres de las señales sean los mismos en el gemelo digital y en el PLC.



## **Capítulo 7. PROGRAMACIÓN DEL PLC**

En este capítulo se arán ciertos puntos calve empleados a la hora de programar el PLC. La programación en sí se recoge en el *Anexo III*.

### **7.1 FILOSOFÍA DE DISEÑO DEL PROGRAMA**

La clave para poder diseñar adecuadamente el programa es modularizar todo lo posible. Se ha realizado una función diferenciada para cada estación, con interacción mínima entre ellas. Sí que es conveniente al menos comunicar entre las estaciones si una está saturada o parada, para que no se siga enviando material.

Debido a que sólo se requiere programar el funcionamiento automático del proceso para demostrar el funcionamiento del gemelo digital, se hará de forma simplificada, incluyendo también la funcionalidad de parada de emergencia.

### **7.2 CLAVES DE BLOQUE CONFORMADORA**

El bloque de la estación conformadora es el que más señales debe controlar, pero debido a su naturaleza lineal y secuencial, no es muy complejo de programar.

En este bloque sí se encuentra un problema con la implantación del código para el control del gemelo que no sucedería en la contraparte real. Se establece en el PLC un tiempo de espera para garantizar que la copa de succión ha agarrado debidamente la caja. Sin embargo, al ralentizarse la ejecución del gemelo por el gran número de cálculos, resultaba que el tiempo especificado en el PLC no era suficiente para que el gemelo pudiese activar la ventosa antes de pasar a la siguiente etapa. Se evidencia por tanto, que hay que ajustar los requisitos de transición temporales para adaptarse al gemelo digital, aunque no sea necesario para la contraparte real.

### **7.3 CLAVES DEL BLOQUE LLENADORA**

El bloque de la estación llenadora es el más sencillo de todos, debido a su reducido número de entradas y salidas. Su única particularidad es que debe comunicar su estado tanto a la conformadora como al proceso de apilado de producto, lo cuál se gestiona mediante variables internas del PLC.

### **7.4 CLAVES DEL BLOQUE SELLADORA**

Este bloque se ha diseñado de forma que la mayor parte de sus funcionalidades están comprendidas en instrucciones posteriores, programadas mediante diagrama de contactos. Es muy similar a la última mitad del bloque de la estación conformadora, solo que es método de impulsión varía. Se implementa un contador para controlar el número de cajas en la estación, deteniendo las palas cuando no haya cajas. Sin embargo, debido a los espacios e 3mm implementados en las juntas del modelo de la caja, el contador sumaba varias veces, al activarse sensor para cada pared de la caja. Se modifica de nuevo el gemelo para evitar este problema, pero deja en evidencia de nuevo que es necesario realizar algunos ajustes para integrar completamente un gemelo digital frente al código necesario para sólo su contraparte física.

## Capítulo 8. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

### 8.1 TRABAJOS FUTUROS

Posteriormente a este trabajo, sería necesario completar la programación del PLC en su totalidad, no sólo el modo automático. Para esto se pueden emplear plantillas de programación, que indican los distintos estados que es necesario considerar para el funcionamiento correcto de la máquina. En concreto, la plantilla PackML se centra en programación para procesos de embalaje, se recoge el esquema general en la *figura 52*.

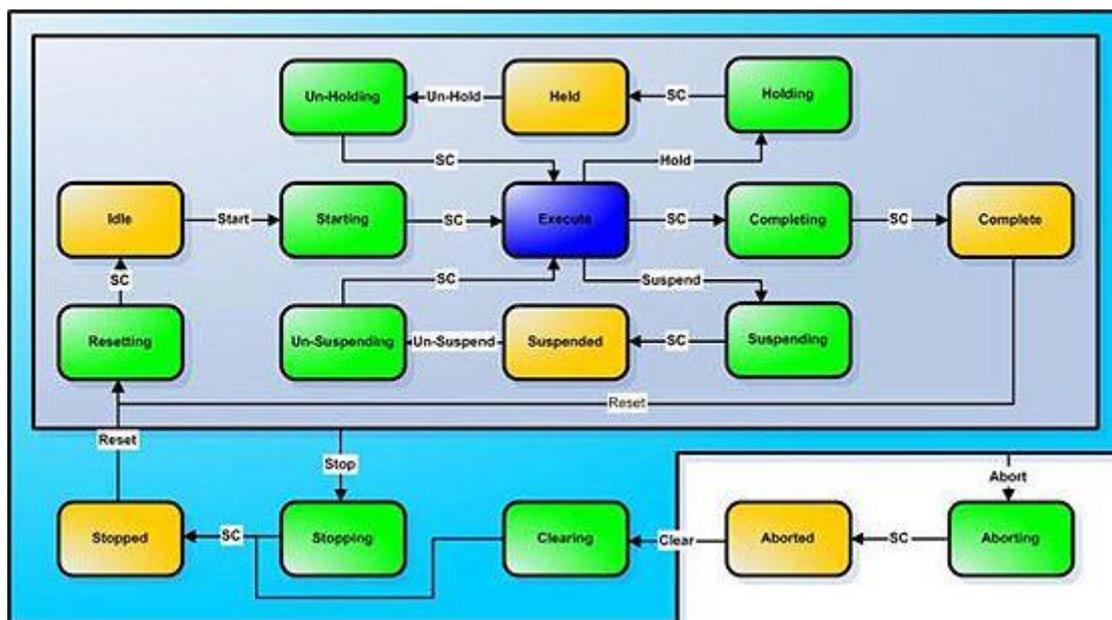


Figura 52. Máquina de estados de plantilla PackML (Mathworks, s.f.)

Si se quiere avanzar el nivel de integración del gemelo digital de 1 a un nivel 2, también es necesario incluir comunicación entre la contraparte física una vez se instale. Un ejemplo de cómo hacerlo podría ser alterar los valores de los parámetros de velocidad de avance de las cintas del entorno digital, en función de la velocidad real del proceso.

## **8.2 MEJORAS AL GEMELO EXISTENTE**

Debido a la inexperiencia, al principio del proyecto se configuraron algunos cuerpos y juntas de manera no óptima. Sería conveniente visitar dichos cuerpos; y optimizar la asignación de recursos mediante la sustitución de las mallas de colisión por geometrías más sencillas y eliminando juntas con bases establecidas en sólidos fijos.

En vistas de los resultados, también sería interesante implementar un control de calidad tras el conformado de la caja, mediante el uso de cámaras. Algunas de las cajas conformadas salen con pequeñas imperfecciones, esto es, sus paredes no perfectamente paralelas. Aunque esto no supone un impedimento para el correcto funcionamiento de la línea, podría ser interesante de cara a estudios de calidad y aplicaciones de nuevas tecnologías de IA para identificar fallos y desperfectos.

## **8.3 CONCLUSIONES PROYECTO**

Para finalizar, se puede concluir que el proyecto ha sido exitoso. Se ha evidenciado que es posible construir un gemelo digital de un proceso sencillo sin conocimientos avanzados de programación.

Se ha conseguido crear un entorno digital interactivo que replica el comportamiento real de una línea de embalaje, permitiendo depurar errores de diseño.

Se valida también, por tanto, la utilidad de los gemelos digitales de primer orden a la hora de planificar y optimizar el tiempo, permitiendo trabajar en la programación del PLC antes de que la línea real sea instalada.

Si bien es cierto que el gemelo digital funciona correctamente, la demanda de recursos es muy elevada, provocando ralentizaciones durante la ejecución. Se evidencia que la principal utilidad de NX MCD no es el modelado de la línea al completo, sino de elementos más pequeños como sub-estaciones. Aunque, por supuesto, una línea puede ser viable siempre que se cuente con el adecuado poder de computación.

## Capítulo 9. BIBLIOGRAFÍA

- Allen, B. D. (2021). Digital Twins and Living models at NASA. *Digital Twin Summit*. Videoconferencia. Recuperado el 17 de septiembre de 2024, de <https://ntrs.nasa.gov/citations/20210023699>
- Amazon Web Service. (s.f.). *¿Qué es la tecnología de gemelos digitales?* Recuperado el 01 de junio de 2024, de <https://aws.amazon.com/es/what-is/digital-twin/>
- Arapack. (s.f.). *Bandejas de uso industrial*. Recuperado el 01 de junio de 2024, de <https://embalajexpress.es/inicio/277-475-cajas-de-carton-de-30cm-a-40cm-de-largo.html#mpd-table-combinations>
- Boschert, S. (2016). Digital Twin—The Simulation Aspect. En S. Boschert, *Mechatronic futures* (págs. 59-74). Springer.
- Comisión Electrotécnica Internacional. (1993). *IEC 61131-3*. Comisión Electrotécnica Internacional.
- Dalmarco, G., & Barros, A. C. (2018). *Adoption of Industry 4.0 Technologies in Supply Chains*. Springer, Cham.
- Ellithy, K. (2024). AGV and Industry 4.0 in warehouses: a comprehensive analysis of existing literature and an innovative framework for flexible automation. *Int J Adv Manuf Technol* 134, 15-38.
- Eulaerts, O., Grabowska, M., & Bergamini, M. (2024). *Weak signals in science and technologies 2024*. Obtenido de Publications office of the European Union el 10 de julio de 2025: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/4cff5301-ece2-11ef-b5e9-01aa75ed71a1/language-en>

- Fernández-Tena, A., Arnedo, C., Houzeaux, G., & Eguzkitza, B. (2024). *Gemelos digitales pulmonares*. Obtenido de Elsevier el 1 de julio de 2025: <https://www.elsevier.es/es-revista-open-respiratory-archives-11-articulo-gemelos-digitales-pulmonares-S2659663624001164>
- Gobierno de España. (2025). *¿Qué es un gemelo digital y cuál es su impacto en la transformación digital de España?* Obtenido de Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia el 30 de junio de 2025 : <https://planderecuperacion.gob.es/noticias/que-es-un-gemelo-digital-y-su-impacto-en-la-transformacion-digital-de-espana-prtr>
- iDavinci. (2021). *Digital Twins: Moldeando el futuro digital de Europa*. Obtenido de iDavinci el 13 de julio de 2025: <https://idavinci.es/digital-twins-moldeando-el-futuro-digital-de-europa/>
- Mathworks. (s.f.). *PackML*. Obtenido de Mathworks el 17 de julio de 2025: <https://es.mathworks.com/discovery/packml.html>
- Mordor Intelligence. (2023). *Análisis de participación y tamaño del mercado de gemelos digitales tendencias y pronósticos de crecimiento (2024-2029)*. Obtenido de Mordor Intelligence el 19 de julio de 2025: <https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/digital-twin-market>
- Omron. (s.f.). *Controlador Lógico Programable (PLC)*. Obtenido de Industrial Omron el 10 de julio de 2025: <https://industrial.omron.es/es/products/programmable-logic-controllers>
- Organización Internacional del Trabajo. (s.f.). *Observatorio de la IA y el Trabajo en la Economía Digital*. Obtenido de Organización Internacional del Trabajo el 01 de julio de 2025: <https://www.ilo.org/es/artificial-intelligence-and-work-digital-economy>
- Organización Naciones Unidas. (21 de octubre de 2015). *Transforming our world: The 2030 Agenda for sustainable development*. Obtenido de sdgs el 17 de septiembre de 2024:

<https://sdgs.un.org/publications/transforming-our-world-2030-agenda-sustainable-development-17981>

Raja Santhi, A., & Muthuswamy, P. (2023). Introduction to industry 4.0 and a peek into the prospective industry 5.0 technologies. *Int J Interact Des Manuf* vol. 17, 947-979.

Redacción Futuro Eléctrico -. (s.f.). *Robótica colaborativa | Cómo beneficia la industria 4.0*. Obtenido de Futuro Eléctrico el 18 de julio de 2025: <https://futuroelectrico.com/robotica-colaborativa/>

Rozo-García, F. (2020). Revisión de las tecnologías presentes en la industria 4.0. *Revista UIS Ingenierías*, 177-192.

Siemens. (s.f.). *Digital Twin*. Recuperado el 30 de mayo de 2024, de siemens: <https://www.sw.siemens.com/en-US/technology/digital-twin/>

Siemens. (s.f.). *Diseño de conceptos mecatrónicos*. Obtenido de Siemens el 18 de julio de 2025: <https://plm.sw.siemens.com/es-ES/nx/cad-online/automation/mechatronic-design/>

Siemens. (s.f.). *Siemens NX MCD*. Obtenido de fh-aachen el 19 de julio de 2025: [https://i40.fh-aachen.de/courses/8610718/basics/mcd\\_basic/index.html#position-controls](https://i40.fh-aachen.de/courses/8610718/basics/mcd_basic/index.html#position-controls)

Siemens. (s.f.). *Software NX CAD*. Obtenido de Siemens el 19 de julio de 2025: <https://plm.sw.siemens.com/es-ES/nx/cad-online/>

Siemens. (s.f.). *TIA Portal (Totally Integrated Automation Portal)*. Obtenido de Siemens el 19 de julio de 2025: <https://www.siemens.com/ar/es/productos/automatizacion/software-industrial/tia-portal.html>

Subramanyan, R. (2024). *What is a Digital Factory and How Does a Digital Twin Fit In?* Obtenido de Digital Twin Consulting el 01 de julio de 2025:

<https://www.digitaltwinconsulting.com/insights/smart-decisions-from-smart-data-with-digital-twins-powered-by-mqtt-and-uns/>

TMG Impianti. (2025). *FLEXROBOT PALLETIZER STATION*. Obtenido de TMG Impianti el 05 de julio de 2025: <https://www.tmgimpianti.com/es/instalaciones/flexrobot-palletizer-station/>

UNE. (2022). *UNE-EN 60848:2022*. UNE. Obtenido de UNE: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0069711>

## **ANEXO I: RELACIÓN CON ODS**

En este anexo se reflexionará sobre cómo puede contribuir este proyecto con respecto a los ODS de la ONU.

Este proyecto está estrechamente relacionado con el objetivo 9 de los objetivos de desarrollo sostenible de la ONU: Industria, innovación e infraestructura (Organización Naciones Unidas, 2015). Además del aspecto de la innovación inherente de este proyecto, el gemelo digital facilita el crecimiento de las industrias acortando el tiempo necesario para planificar e instalar la maquinaria necesaria. Además, permite optimizar recursos a la hora de controlar el proceso en sí.

Concretamente, se adapta bien a la meta 9.4: “De aquí a 2030, modernizar la infraestructura y reconvertir las industrias para que sean sostenibles, utilizando los recursos con mayor eficacia y promoviendo la adopción de tecnologías y procesos industriales limpios y ambientalmente racionales, y logrando que todos los países tomen medidas de acuerdo con sus capacidades respectivas” (Organización Naciones Unidas, 2015).

Este proyecto contribuye a esta meta modernizando y automatizando el proceso de embalaje, a la vez que facilitando la planificación de líneas a través de la divulgación del modelo.

También se adecúa a la meta 9.5: “Aumentar la investigación científica y mejorar la capacidad tecnológica de los sectores industriales de todos los países, en particular los países en desarrollo, entre otras cosas fomentando la innovación y aumentando considerablemente, de aquí a 2030, el número de personas que trabajan en investigación y desarrollo por millón de habitantes y los gastos de los sectores público y privado en investigación y desarrollo” (Organización Naciones Unidas, 2015).

Al divulgarse y desarrollarse de forma generalizada y fácil de entender, permite a pequeñas empresas e industrias en países menos desarrollados familiarizarse con nuevas tecnologías.

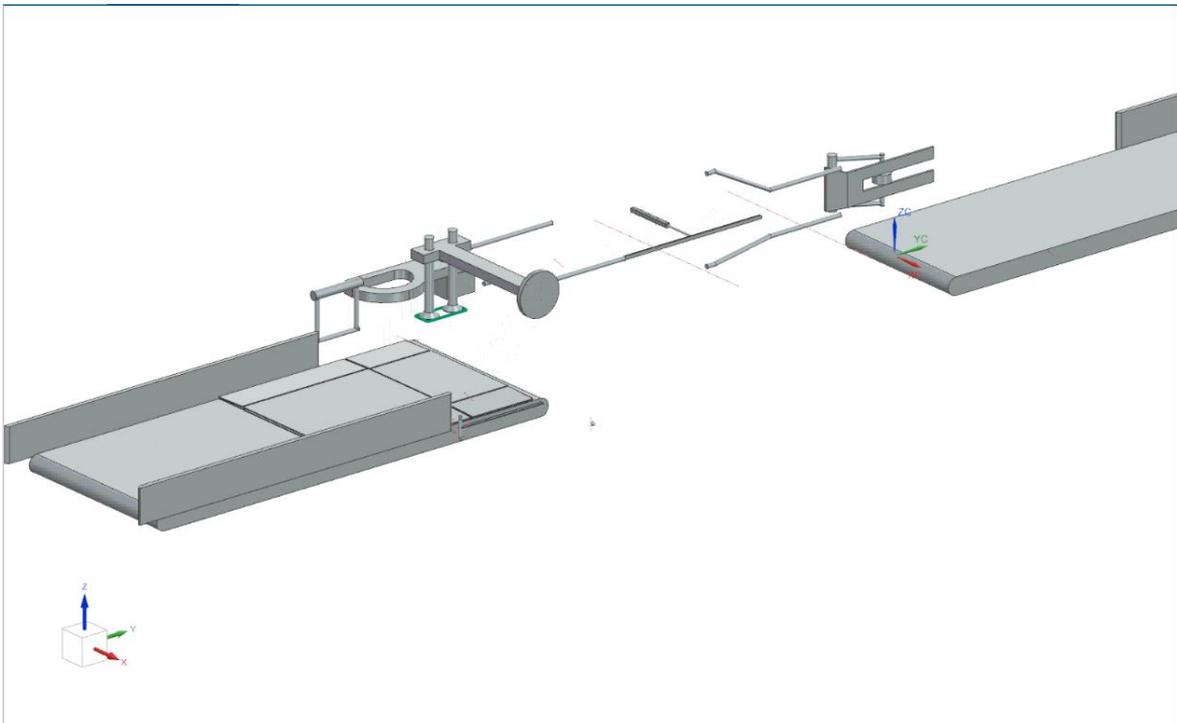
También se puede considerar que este proyecto contribuye, aunque de forma menos directa, con el objetivo 8: Trabajo decente y crecimiento económico (Organización Naciones Unidas, 2015). El uso de un gemelo digital durante la fase de planificación de un producto o línea de producción acorta considerablemente el tiempo necesario para que esté operativo. Esto implica una reducción del coste inicial, favoreciendo el nacimiento de nuevas empresas y líneas. Con esta reducción de la barrera de entrada al mercado, es razonable esperar que se generen puestos de trabajo y haya crecimiento económico.

El objetivo 12: Producción y consumo responsables (Organización Naciones Unidas, 2015); también está asociado de forma indirecta con el proyecto. El uso del gemelo digital como herramienta de control remoto permite realizar un mantenimiento predictivo de un proceso. Este tipo de mantenimiento soluciona averías antes de que sucedan; permitiendo así disminuir el consumo de recambios en la maquinaria, así como la cantidad de productos defectuosos que habría que desechar.

## ANEXO II: CAPTURAS DEL PROCESO DE EMBALAJE

### EN FUNCIONAMIENTO

#### *ESTACIÓN CONFORMADORA*



*Figura 53. Proceso conformadora: Estado inicial*

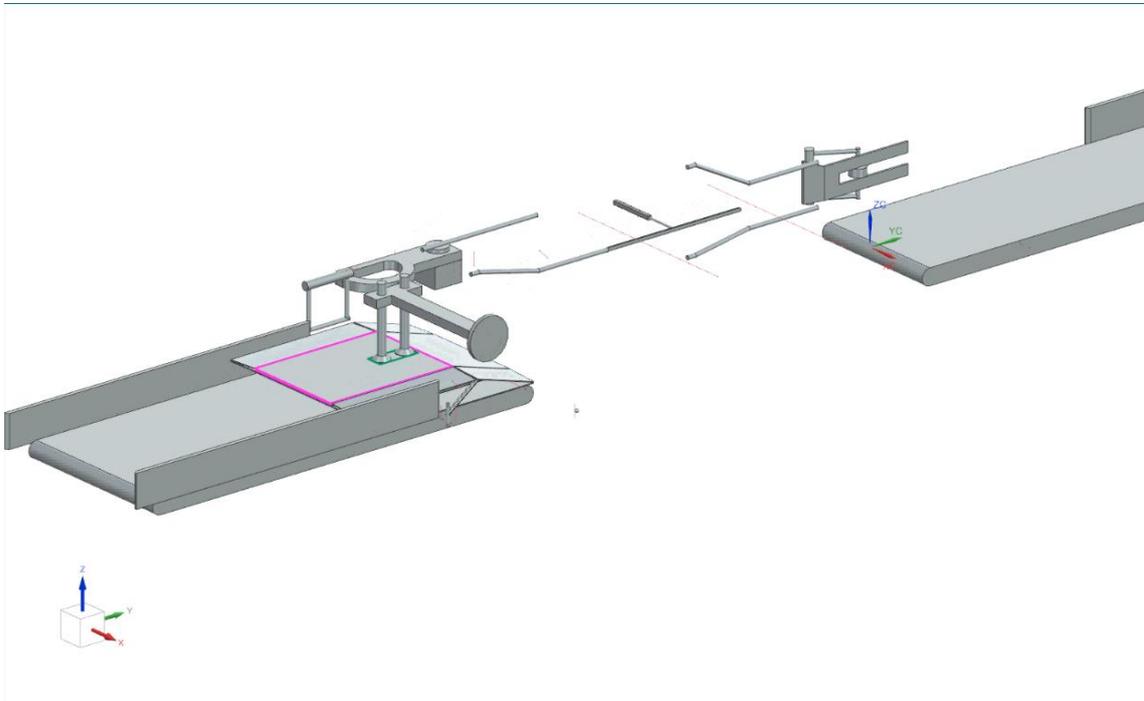


Figura 54. Proceso conformadora: Brazo de succión eleva la caja mientras que el aguantador se introduce en la apertura

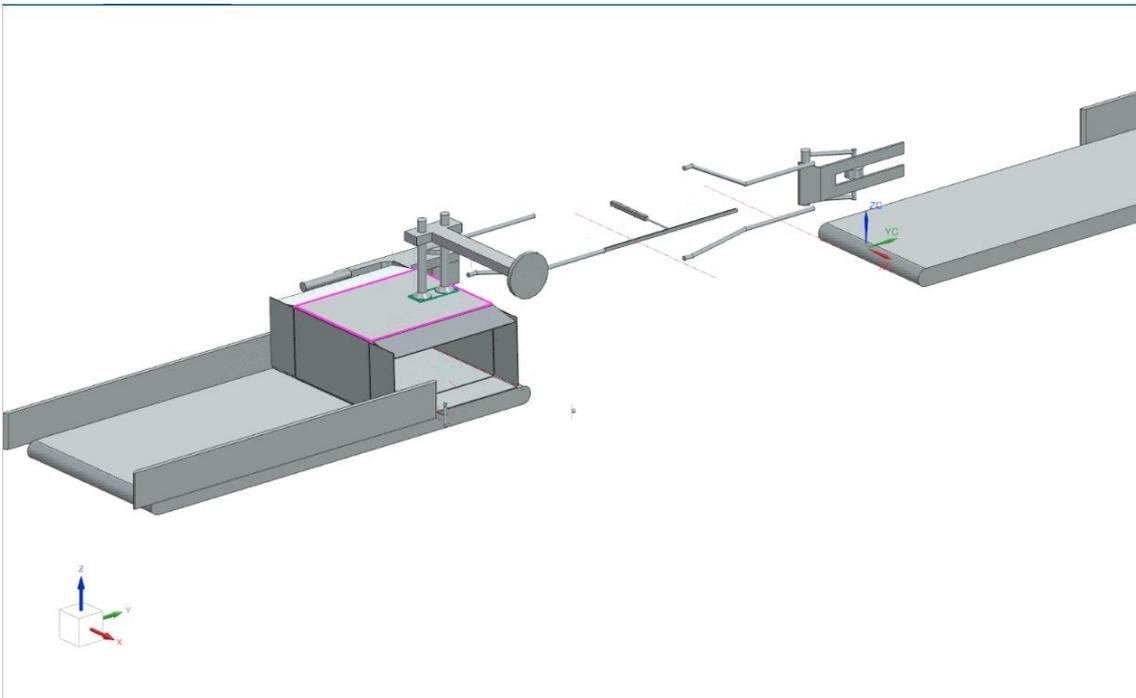


Figura 55. Proceso conformadora: Caja completamente conformada

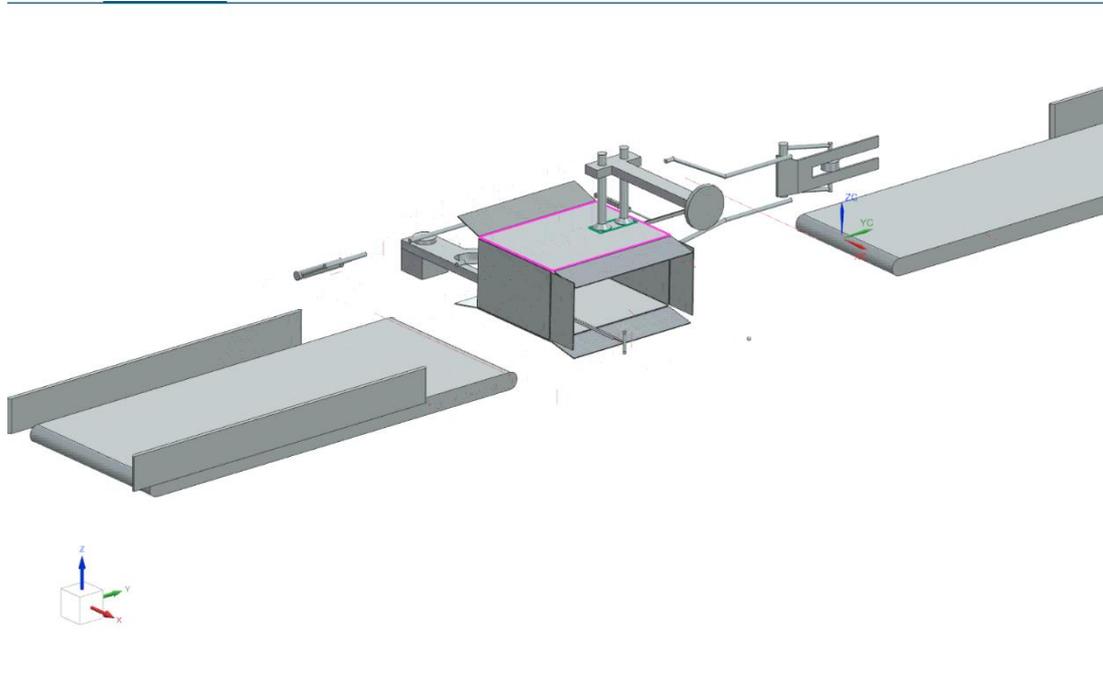


Figura 56. Proceso conformadora: Caja avanza hasta posición de empujador, donde se doblan las solapas

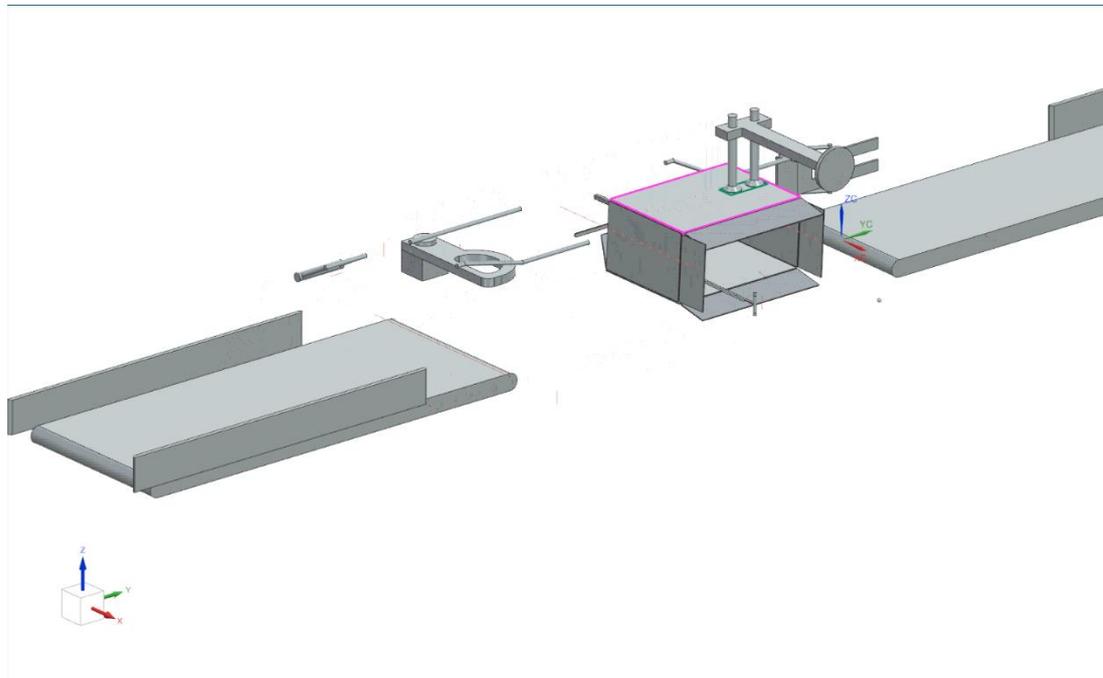
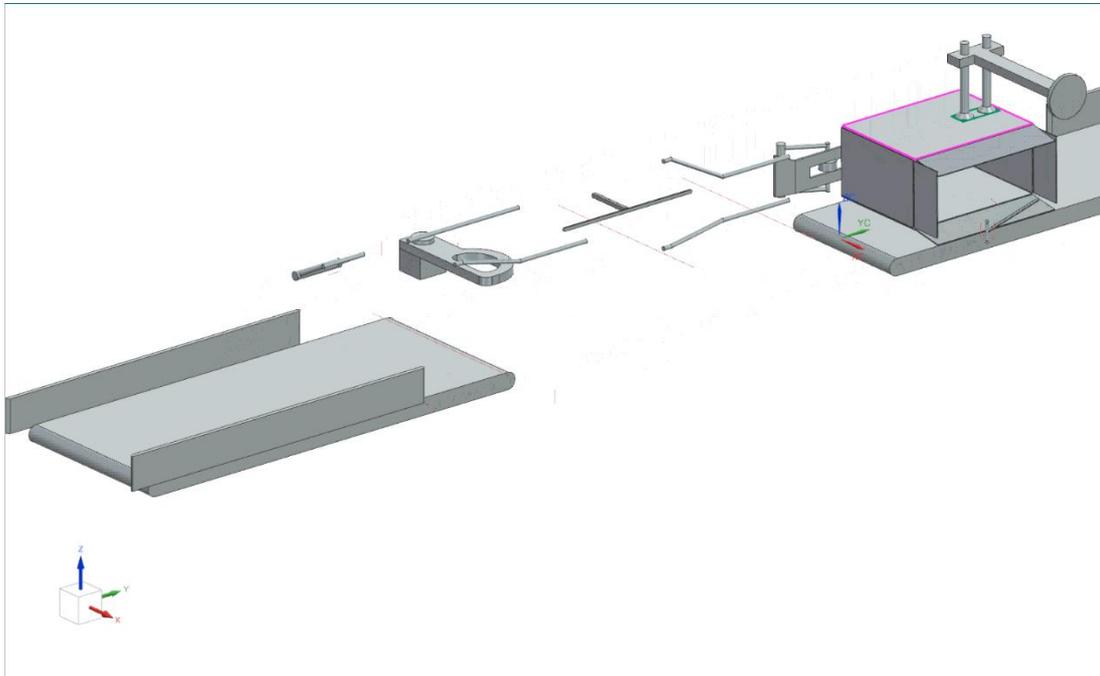


Figura 57. Proceso conformadora: Pistón guía se retira tras conformarse las solapas largas



*Figura 58. Proceso conformadora: Aguantador se retira tras el sellado de la base*

## ESTACIÓN DE LLENADO

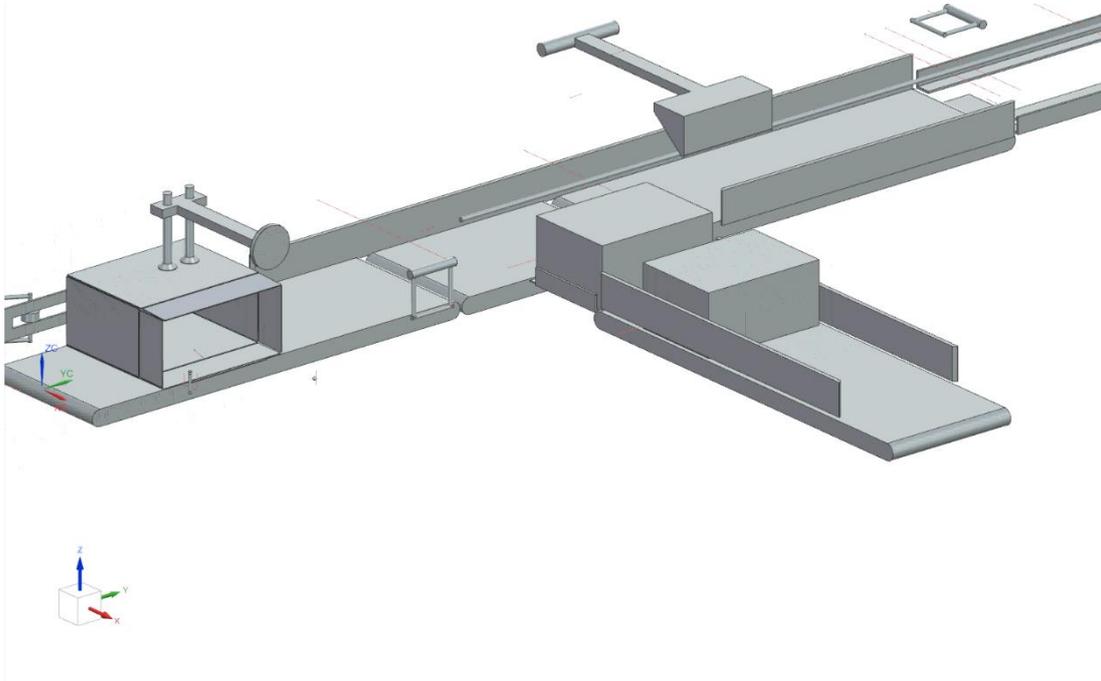


Figura 59. Proceso llenado: Se deposita caja conformada sobre cinta de alimentación

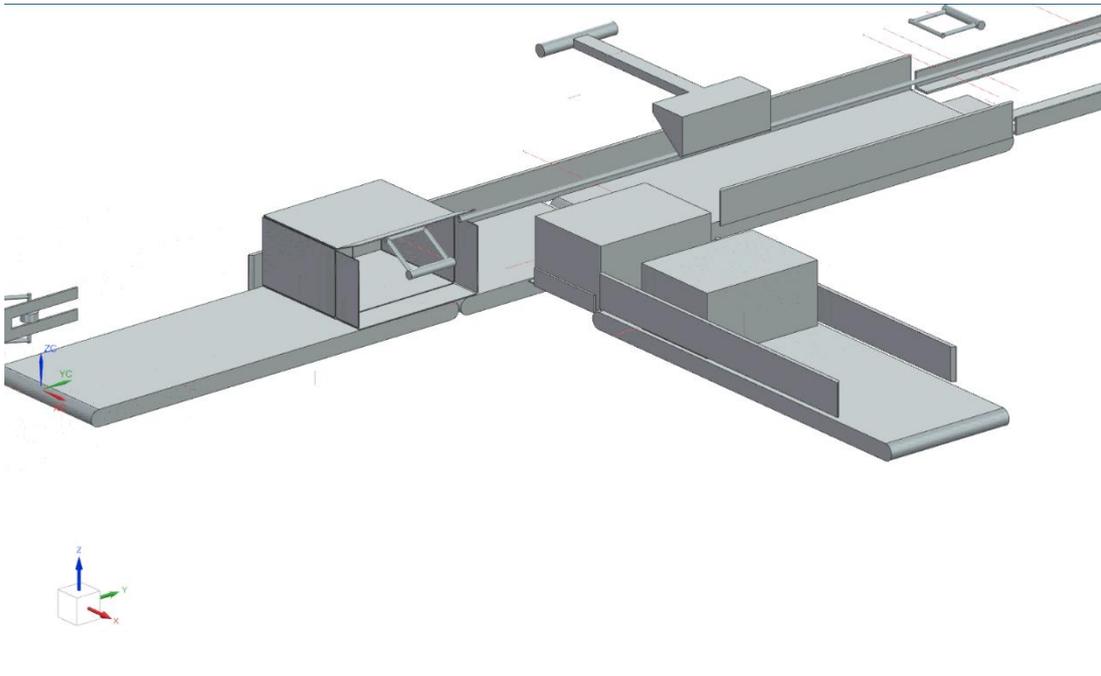
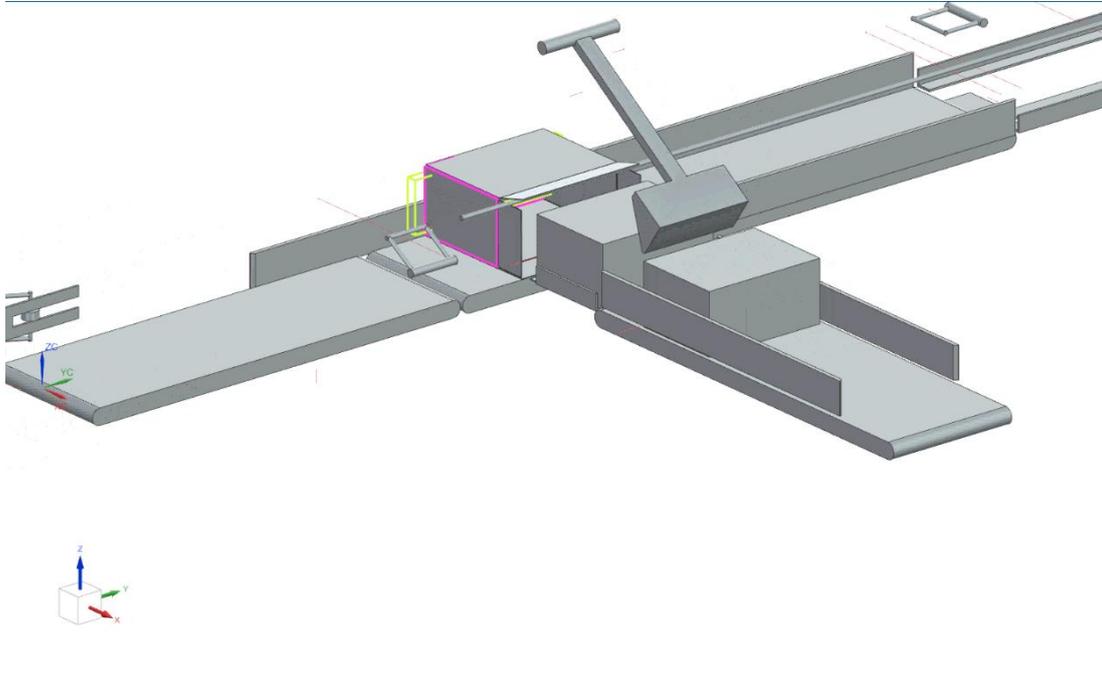
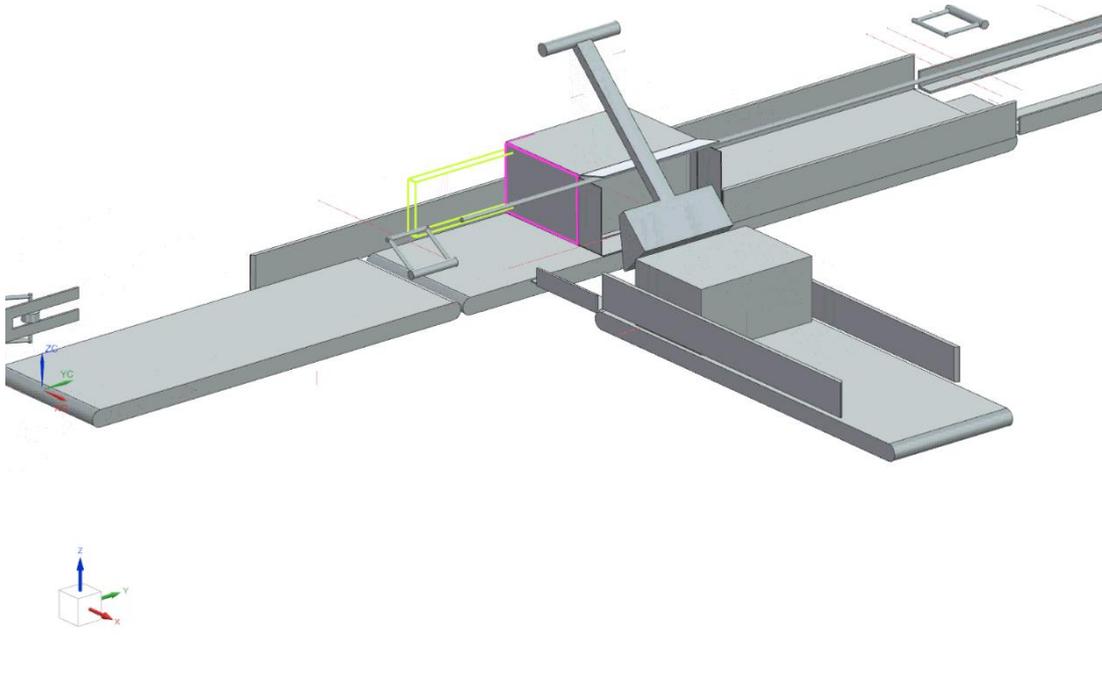


Figura 60. Proceso llenado: Se sube la solapa superior

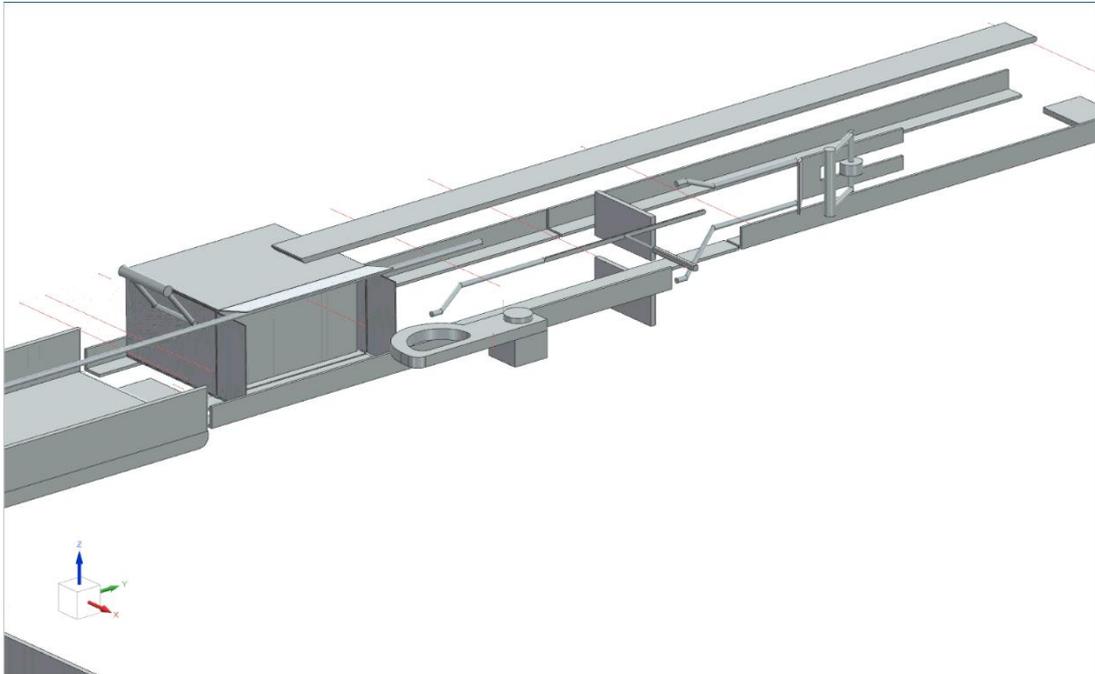


*Figura 61. Proceso llenado: Caja se sitúa en posición y empujador descende*

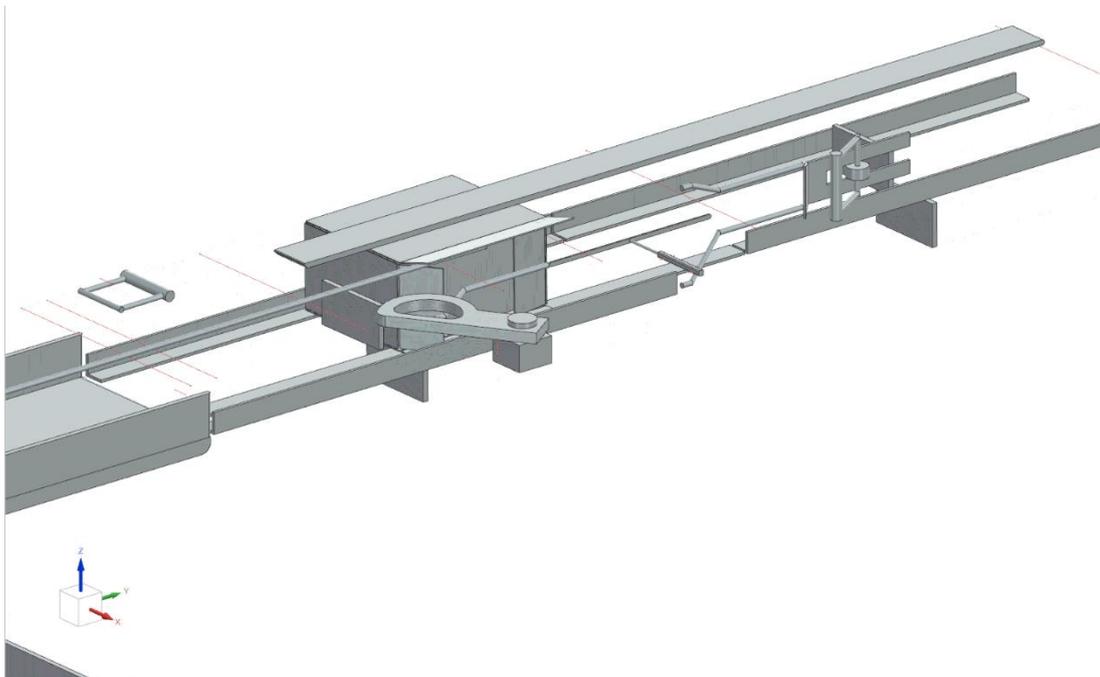


*Figura 62. Proceso llenado: Tras llenado, caja continua por la cinta y empujador asciende*

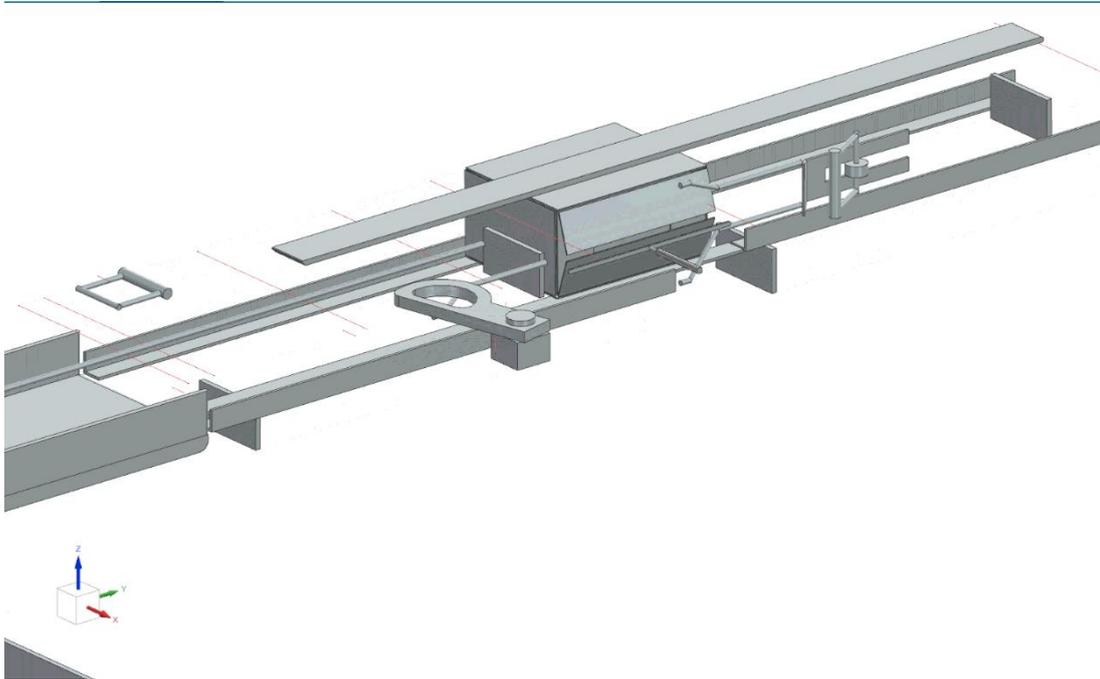
## ***ESTACIÓN DE SELLADO DE TAPA***



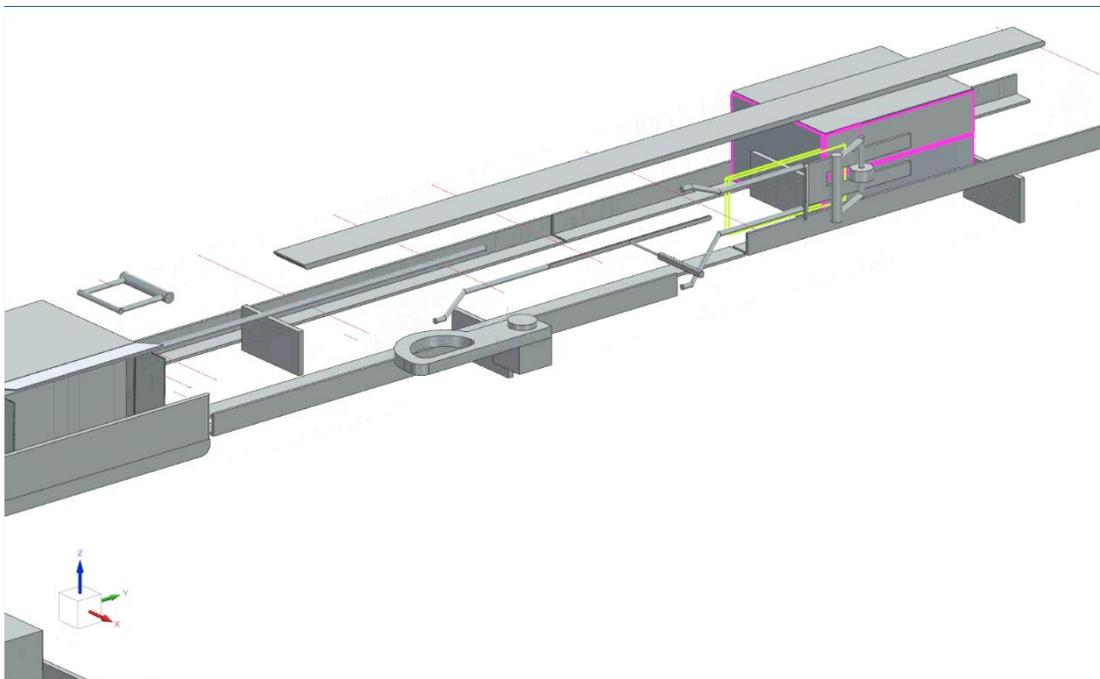
*Figura 63. Proceso de sellado: Empujador coloca la caja sobre los railes*



*Figura 64. Proceso de sellado: Palas empujan la caja hasta empujador de solapas*



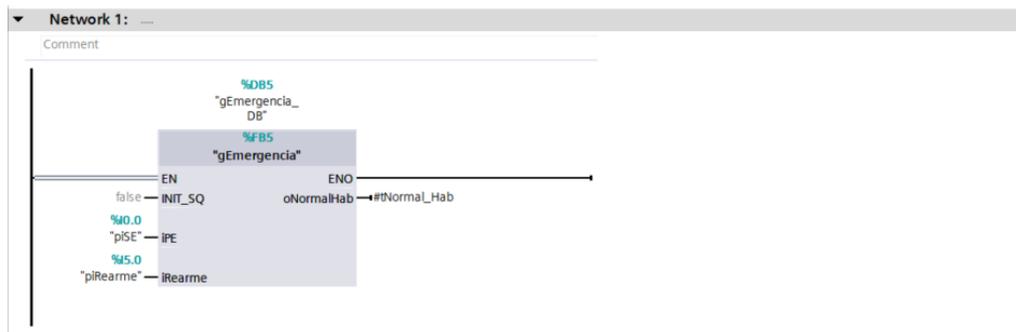
*Figura 65. Proceso de sellado: Pistón guía se retrae cuando se conforman las solapas superior e inferior*



*Figura 66. Proceso de sellado: Se precinta la tapa*

## ANEXO III: CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN PLC

### *SEGMENTOS DEL MAIN*



*Figura 67. Segmento Main 1*

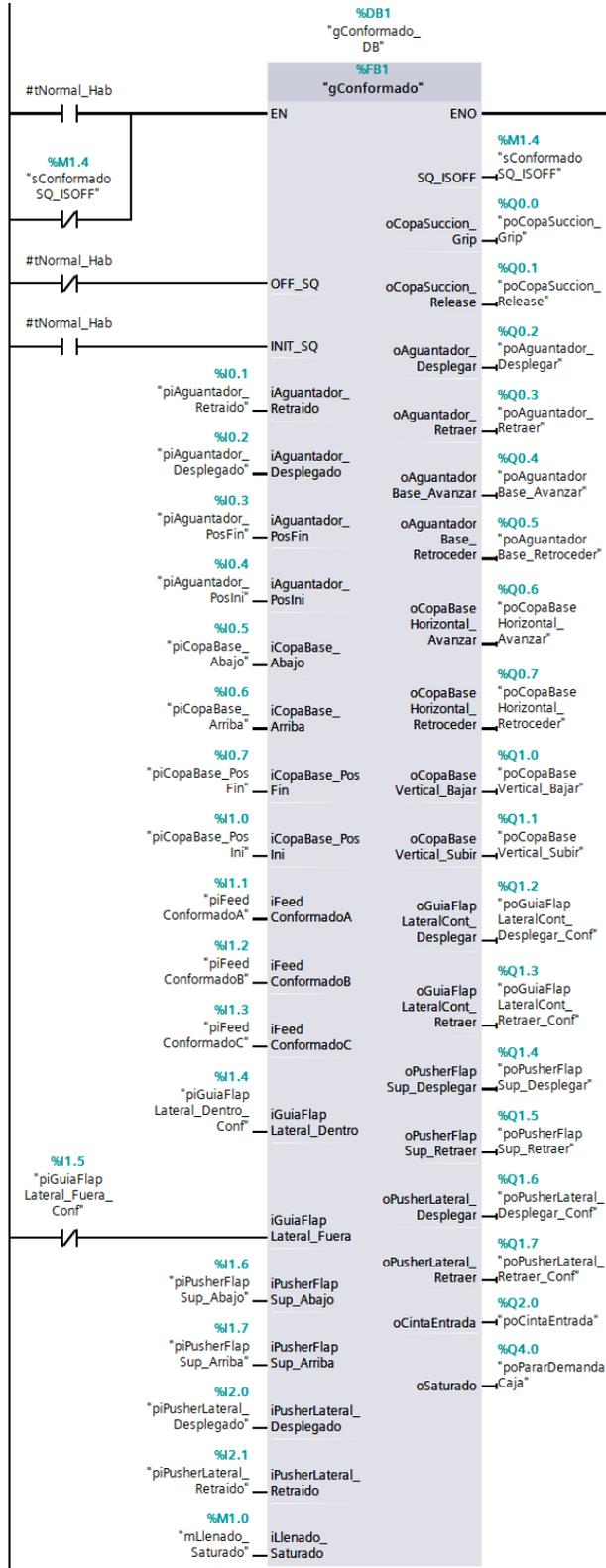


Figura 68. Segmento Main 2

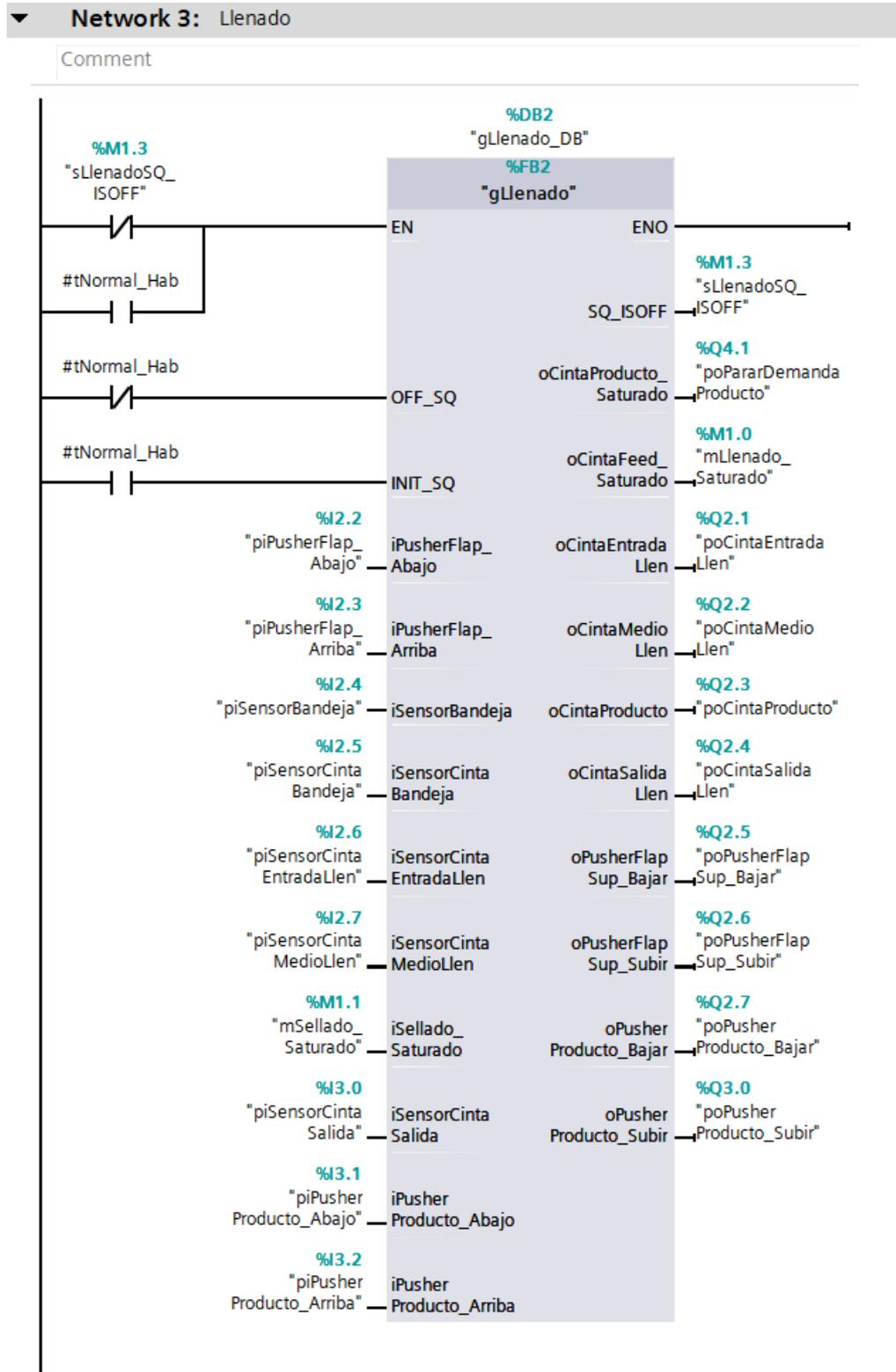


Figura 69. Segmento Main 3

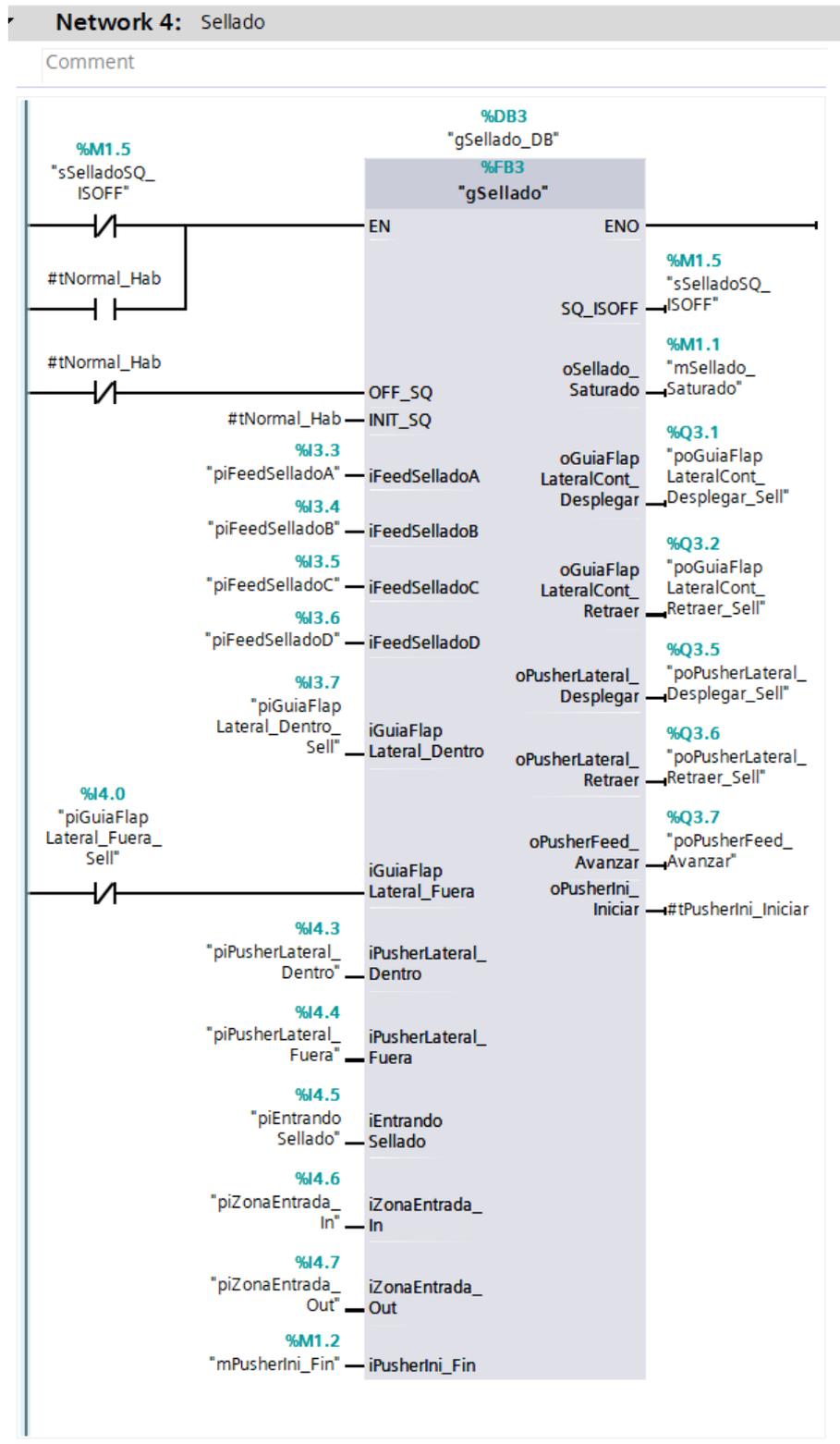


Figura 70. Segmento Main 4

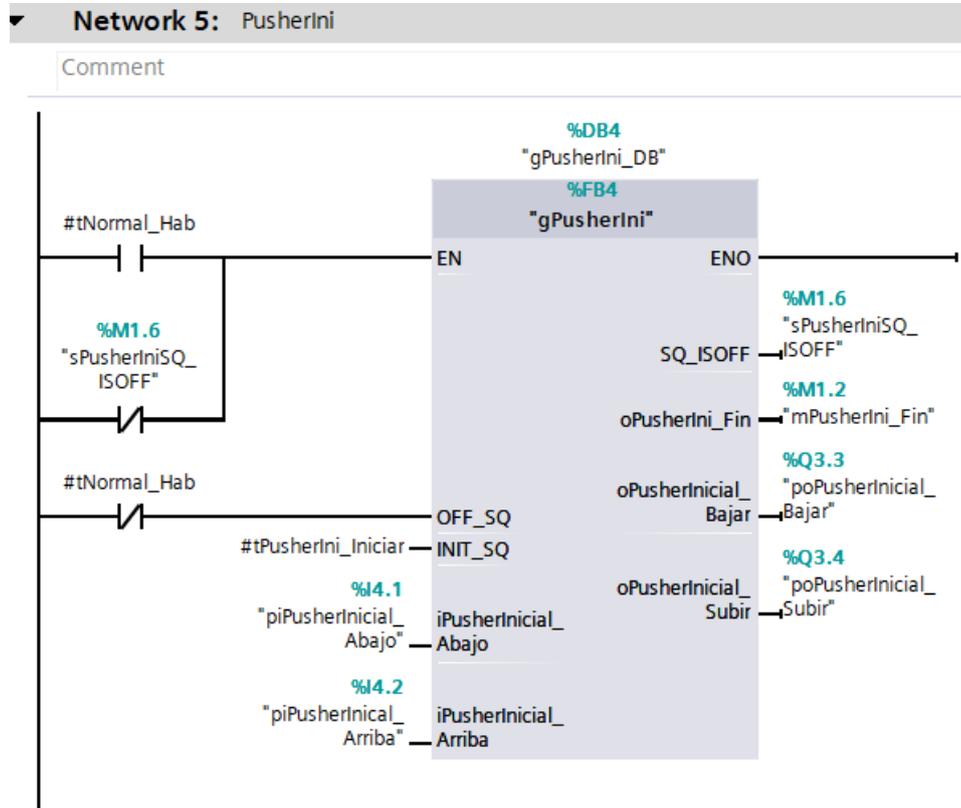


Figura 71. Segmento Main 5

**PROGRAMACIÓN BLOQUE CONFORMADORA**

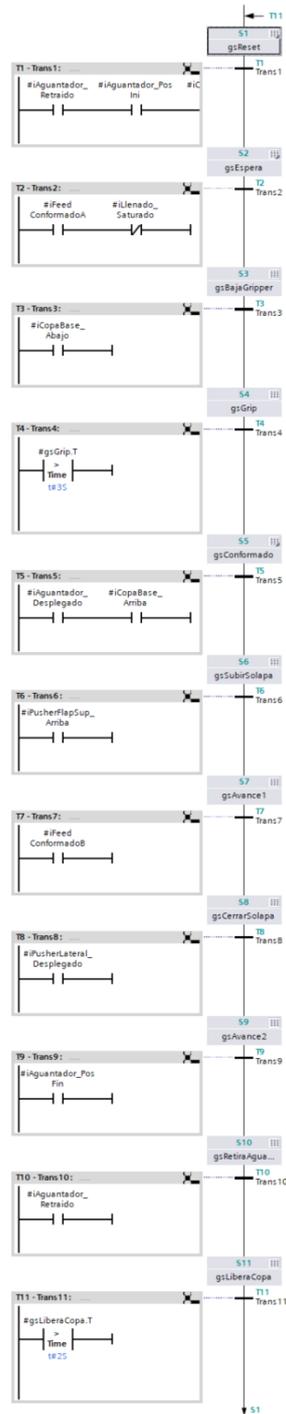
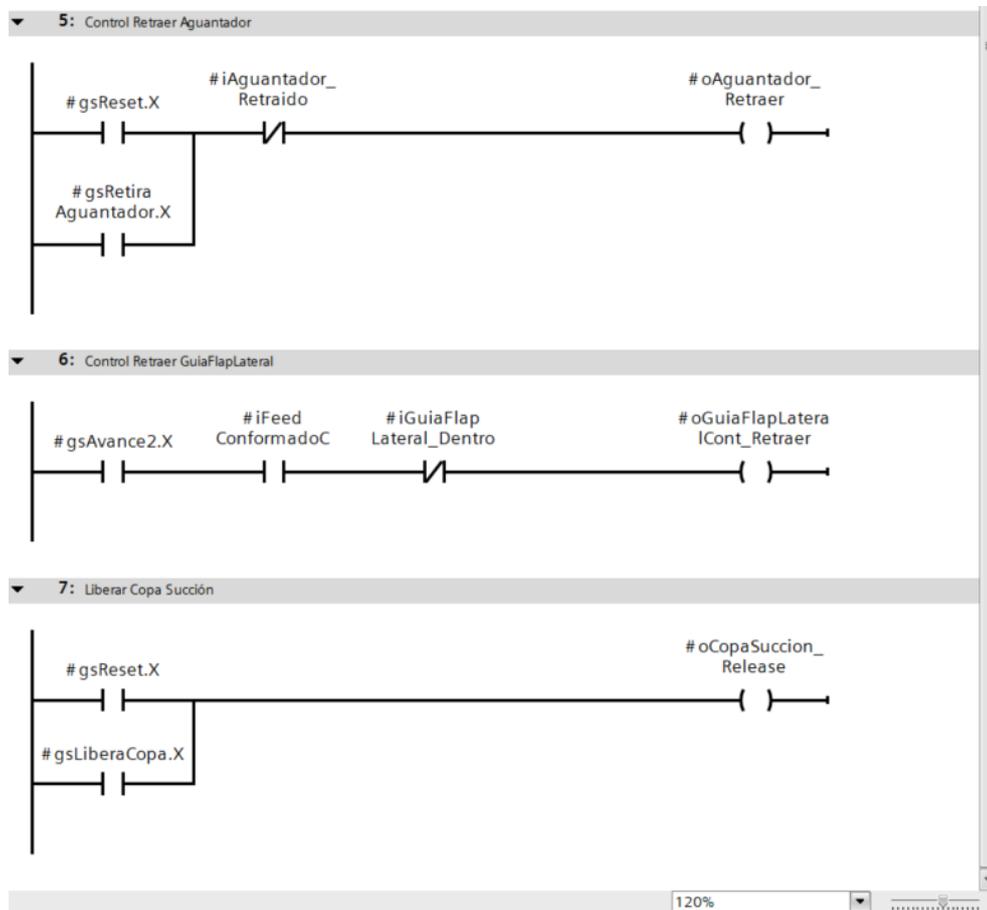


Figura 72. Grafcet conformadora



Figura 73. Instrucciones posteriores conformadora 1



*Figura 74. Instrucciones posteriores conformadora 2*

**PROGRAMACIÓN BLOQUE DE LLENADO**

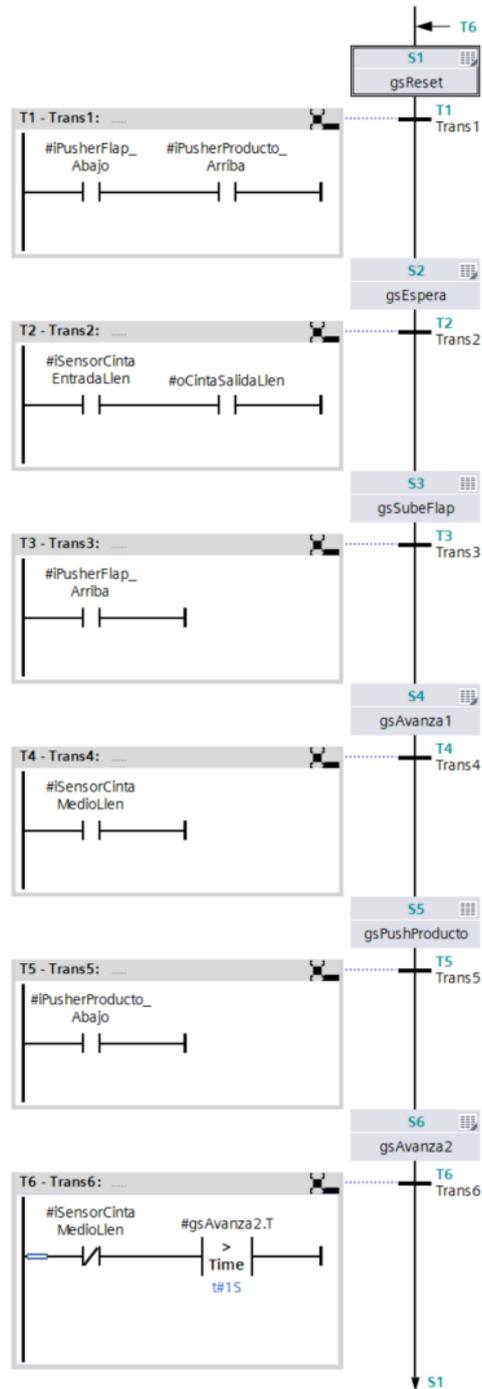
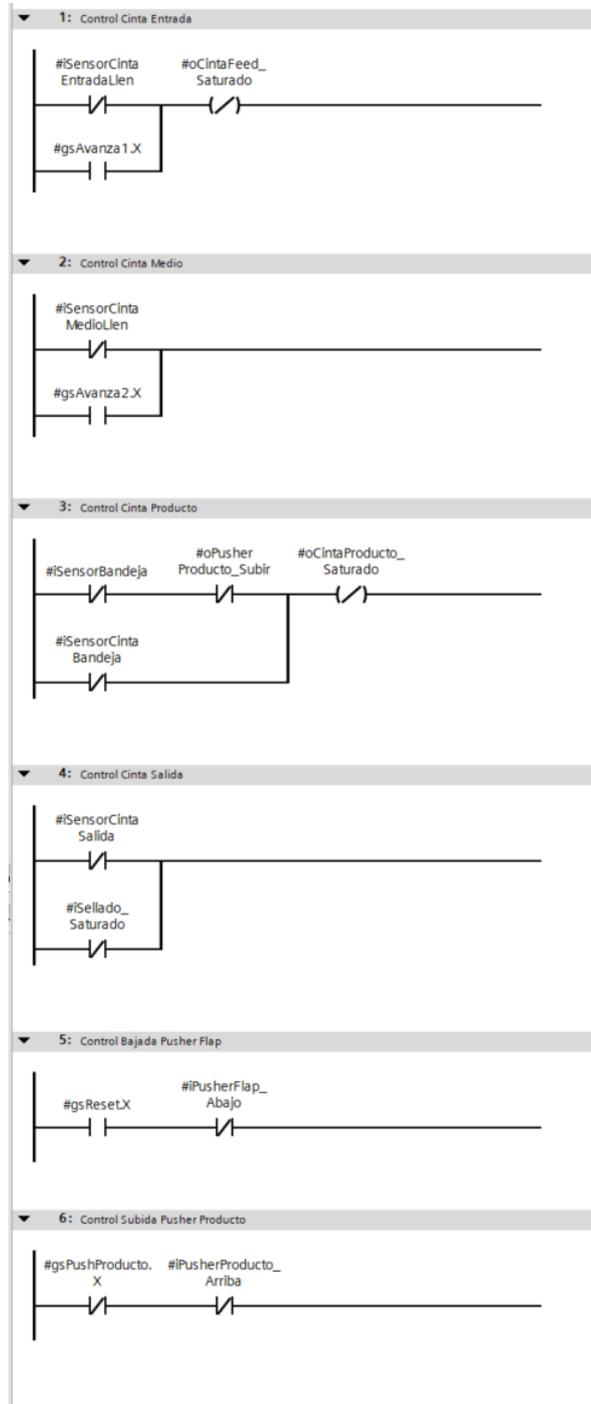


Figura 75. Grafcet llenado



*Figura 76. Instrucciones posteriores llenado 1*

**PROGRAMACIÓN BLOQUE SELLADO**



Figura 77. Grafcet sellado

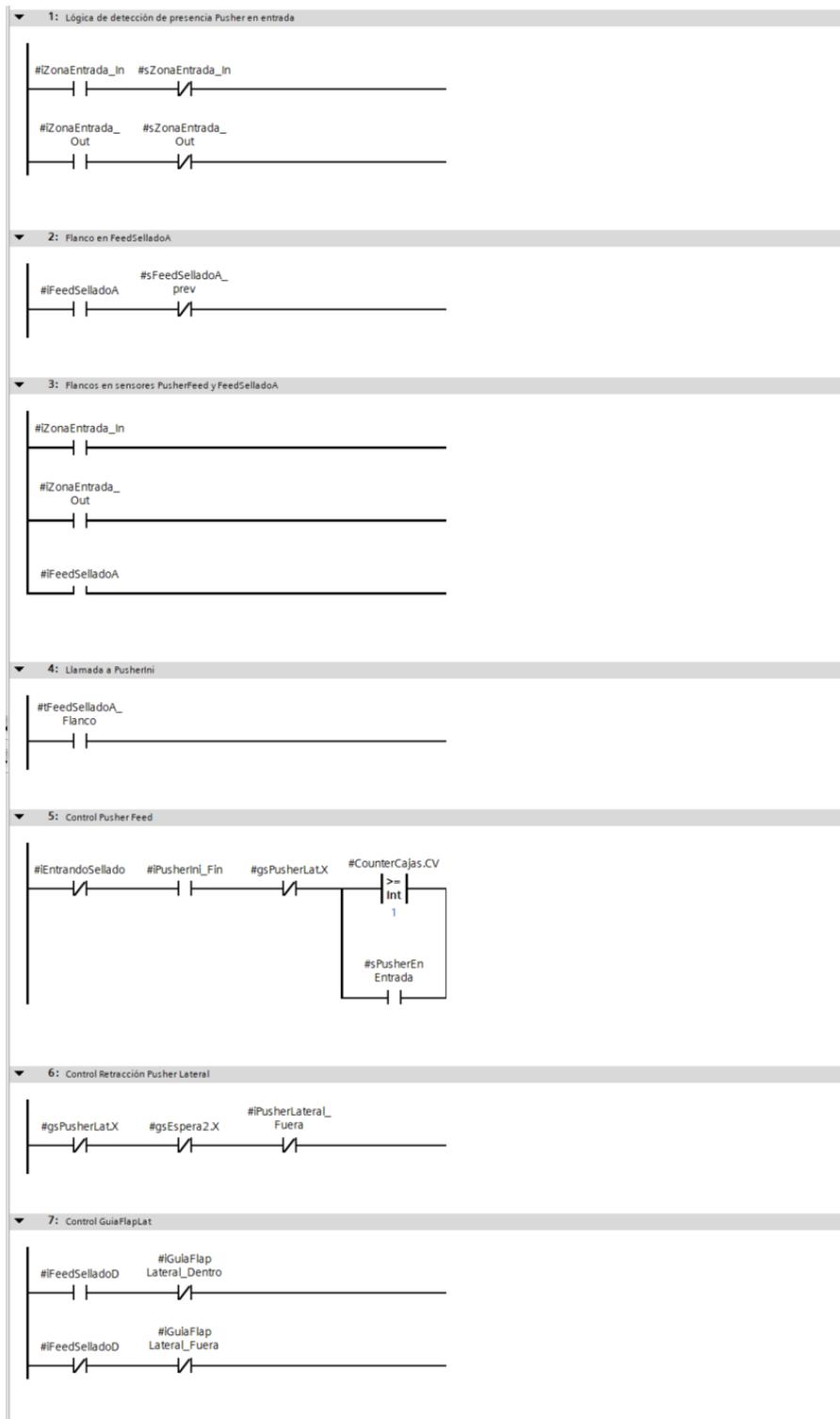


Figura 78. Instrucciones posteriores sellado 1

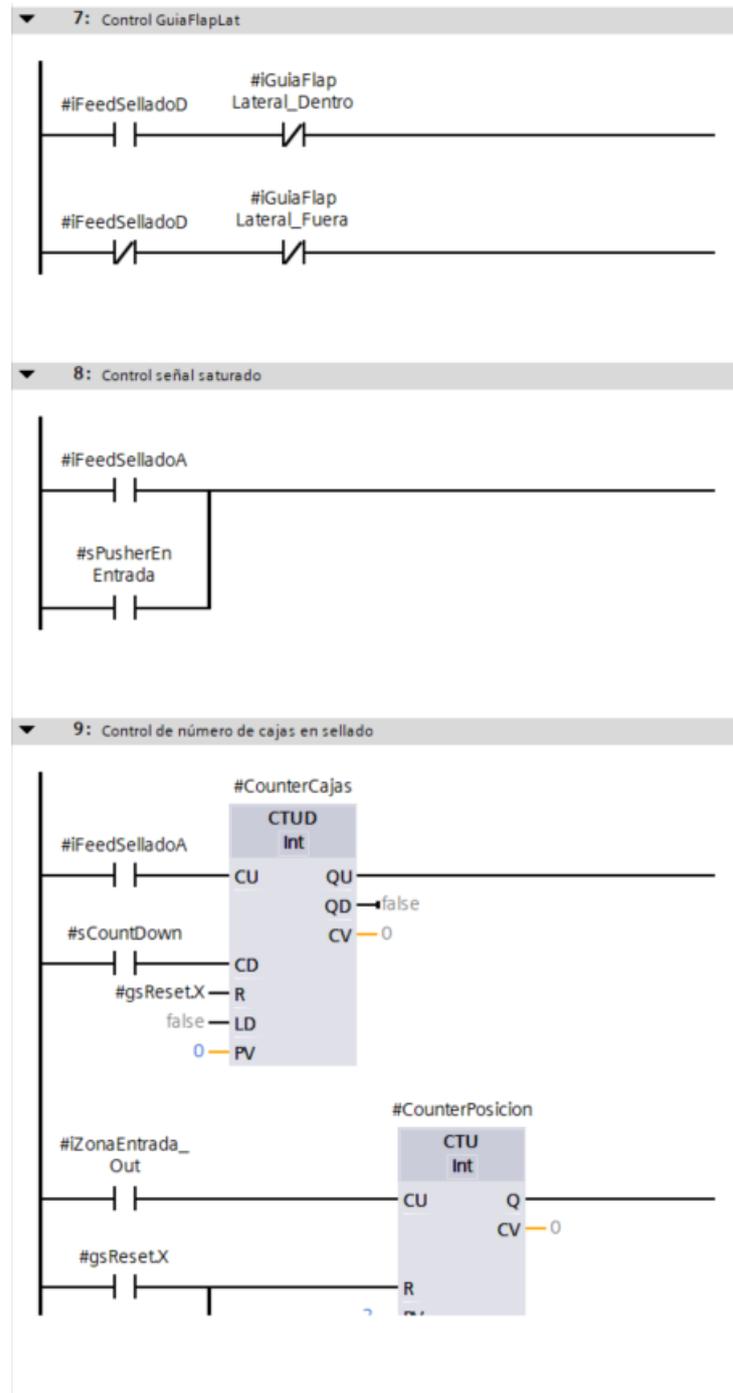


Figura 79. Instrucciones posteriores sellado 2