



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

**DESARROLLO DE UN GEMELO DIGITAL DE LAS ESTACIONES DE MANIPULACIÓN
Y PROCESO DEL SISTEMA DE PRODUCCIÓN MODULAR MPS 500 DE FESTO**

Trabajo de titulación previo a la obtención
del título de Ingeniero Electrónico

AUTORES: DANIEL VINICIO NARANJO SANANGO

LUIS FERNANDO ZHINGRI TORRES

TUTOR: ING. JULIO CÉSAR ZAMBRANO ABAD, MSc., PHD.

Cuenca - Ecuador

2022

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Daniel Vinicio Naranjo Sanango con documento de identificación N° 0301802278 y Luis Fernando Zhingri Torres con documento de identificación N° 0104818091; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 20 de septiembre del 2022

Atentamente,



Daniel Vinicio Naranjo Sanango
0301802278



Luis Fernando Zhingri Torres
0104818091

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Nosotros, Daniel Vinicio Naranjo Sanango con documento de identificación N° 0301802278 y Luis Fernando Zhingri Torres con documento de identificación N° 0104818091; expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto técnico con enfoque investigativo: “Desarrollo de un gemelo digital de las estaciones de manipulación y proceso del sistema de producción modular MPS 500 de Festo”, el cual ha sido desarrollada para optar por el título de: Ingeniero Electrónico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 20 de septiembre del 2022

Atentamente,



Daniel Vinicio Naranjo Sanango
0301802278



Luis Fernando Zhingri Torres
0104818091

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Julio César Zambrano Abad con documento de identificación N° 0301489696, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DESARROLLO DE UN GEMELO DIGITAL DE LAS ESTACIONES DE MANIPULACIÓN Y PROCESO DEL SISTEMA DE PRODUCCIÓN MODULAR MPS 500 DE FESTO, realizado por Daniel Vinicio Naranjo Sanango con documento de identificación N° 0301802278 y por Luis Fernando Zhingri Torres con documento de identificación N° 0104818091, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto técnico con enfoque investigativo que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 20 de septiembre del 2022

Atentamente,



Ing. Julio César Zambrano A. MSc. PhD.
0301489696

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer a todas las autoridades y personal que conforman la universidad por acompañar y siempre brindar ayuda a los estudiantes que la conforman para finalizar a personas y compañeros que formaron parte en el proceso de investigación y redacción de este trabajo y vida universitaria.

Luis Fernando Zhingri Torres

Quiero expresar mi agradecimiento a mis padres por el constante apoyo, pues me han sabido brindar los recursos para poder cumplir con este objetivo y con muchos otros más; agradecer a mis hermanos, quienes con sus palabras y experiencias me ayudaron también para saber afrontar este camino en la formación profesional.

También agradecer al personal docente de la carrera de ingeniería Electrónica, pues a lo largo de la vida universitaria, de una u otra manera han sabido prepararnos a los estudiantes para la vida profesional. De manera especial al Ing. Julio Zambrano PhD, por acceder a ser nuestro guía en el desarrollo de este proyecto de titulación.

Daniel Vinicio Naranjo Sanango

DEDICATORIA

Este trabajo lo dedico a mis padres y hermano MARCO ZHINGRI, que a pesar de la distancia siempre estuvieron acompañándome, sé que este momento hubiere sido tan especial como para mí como para ellos, y especialmente a mi tía NARCISA ZHINGRI, a quien considero como mi madre, por mostrarme su cariño inculcándome siempre los mejores valores.

De igual manera a todas las personas que de alguna u otra manera formaron parte de todo este proceso, a quienes estuvieron presentes en los mejores y peores momentos amigos, familia, que no se les menciona individualmente por lo limitado de la sección, pero ellos saben que sin su apoyo esto no sería posible.

Luis Fernando Zhingri Torres

Quiero dedicar el desarrollo de este proyecto de titulación a mis padres Anita María y Carlos Alberto, por el apoyo incondicional en el transcurso de la carrera universitaria, de igual manera a mis hermanos Carlos Armando y Álvaro Paul, quienes nunca me hicieron faltar un consejo para poder afrontar todo este proceso. A toda mi familia y novia Paulina por las palabras de aliento que he sabido recibir de su parte y sobre todo el cariño y el aprecio que tienen hacia mi persona.

Dedico también a todas las personas como amigos y futuros colegas, que formaron parte de este camino y de una u otra manera junto con ellos hemos sabido salir y completar metas académicas a lo largo de esta trayectoria.

Daniel Vinicio Naranjo Sanango

ÍNDICE

Índice	I
Glosario	III
Resumen	IV
Introducción.....	V
Antecedentes.....	VI
Justificación	VII
Objetivos.....	VIII
Objetivo general.....	VIII
Objetivo específico	VIII
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN A LOS GEMELOS DIGITALES	1
1.1 Industria 4.0.	1
1.2 Pilares de la industria 4.0	2
1.3 Gemelos digitales en el contexto industrial	6
CAPÍTULO 2 MARCO METODOLÓGICO	11
2.1 Siemens NX 12	11
2.2 Siemens NX 12 MCD o Diseño de concepto de electrónica.....	13
2.3 TIA Portal	15
2.4 PLCSIM Advanced.....	16
2.5. Descripción de funciones de Siemens NX MCD.....	17
2.5.1. Interfaz y menú.....	17
2.5.2. Elementos más utilizados	21
CAPÍTULO 3 IMPLEMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	32
3.1. Modelado CAD y ensamble de las estaciones	32
3.2. Estación de manipulación del sistema de producción modular de MPS 500 de Festo	38

3.2.1.	Descripción del ciclo de trabajo de la estación de manipulación	38
3.2.2.	Descripción de los elementos de la estación de manipulación.....	40
3.2.3.	Modelado de la estación de manipulación con Siemens NX MCD	42
3.3.	Estación de proceso del sistema de producción modular de MPS 500 de Festo	52
3.3.1.	Descripción de ciclo de trabajo de la estación de proceso	52
3.3.2.	Descripción de los elementos de la estación de proceso	54
3.3.3.	Modelado de la estación de proceso con Siemens NX MCD	58
3.4.	Comunicación de los modelos en Siemens NX con el PLC Virtual y descripción del programa del PLC.....	71
3.4.1.	Descripción del proyecto de TIA Portal para la estación de manipulación.....	71
3.4.2.	Descripción del proyecto de TIA Portal para la estación de proceso.....	72
3.5.	Comunicación de Siemens NX y PLCSIM Advanced.....	73
3.6.	Análisis y ventajas de los gemelos digitales de las estaciones de producción modular MPS 500 de Festo.....	76
CAPÍTULO 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		80
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		82
Índice de figuras		86
Índice de tablas		89
Anexo 1. Proyecto de la estación de manipulación en TIA Portal		90
Anexo 2. Proyecto de la estación de proceso en TIA Portal.....		97

GLOSARIO

MPS: Sistema de producción modular

PLC: Controlador lógico programable

MCD: Mechatronics Concept Designer / Diseño de concepto de mecatrónica

CAD: Computer-Aided Desing / Diseño asistido por computador

CAM: Computer-Aided Manufacturing / Manufactura asistida por computador

CAE: Computer-Aided Engineering / Ingeniería asistida por computador

IA: Ingeniería artificial

IOT: Internet of Thing / Internet de las cosas

RESUMEN

El objetivo principal de este trabajo es desarrollar un gemelo digital de dos estaciones del sistema de producción modular MPS 500 de Festo. Específicamente se trata de las estaciones de manipulación y proceso. El desarrollo de este proyecto se ha plasmado en tres partes fundamentales: fundamentación teórica, marco metodológico y la implementación.

La primera parte es de carácter introductoria, en esta se analizan algunos fundamentos disponibles en la literatura técnica relacionados a la industria 4.0, destacando sus puntos claves y relacionándolos con el concepto de los gemelos digitales y todas las herramientas para su desarrollo.

En la segunda parte se hace un abordaje a los paquetes informáticos utilizados para el desarrollo de los gemelos digitales. Para este caso se utilizó como insumos TIA PORTAL, Siemens NX y PLCSIM, todos estos de la marca Siemens. En esta parte del trabajo se destaca las ventajas de estas herramientas, funciones y versatilidad.

Por último, en la siguiente parte se presenta el contenido práctico de este trabajo. En esta parte se abordará de una manera detallada la elaboración de los gemelos digitales correspondientes a las estaciones de manipulación y proceso del MPS 500. En complemento se darán detalles de la automatización de las estaciones a través de TIA PORTAL con su respectiva simulación utilizando la herramienta PLCSIM.

INTRODUCCIÓN

Brevemente explicado, la industria 4.0 surge de los constantes cambios e innovaciones que el mundo tecnológico ha tenido, por lo tanto, se denomina cuarta revolución industrial a la implementación de estructuras físicas con estructuras virtuales, lo cual cambia la manera de manejar y producir los procesos.

A efecto de la rápida evolución tecnológica en el entorno social actual, múltiples organizaciones, independientemente de la actividad a la cual sea su propósito, se ven en la necesidad de implementar facilidades tecnológicas tanto para los usuarios y clientes. De igual manera se aplica en el entorno industrial, las nuevas tecnologías vienen apoyando al sector productivo con el objetivo de mejorar la línea de fábrica y sobre todo productos de calidad para el usuario final, cumpliendo con todos los estándares establecidos sobre dicho producto.

Un gemelo digital llega a consecuencia de la necesidad de crear procesos mayormente efectivos a la hora de ser ejecutados, por lo tanto, la implementación de los gemelos digitales en la industria contribuirá en el desarrollo de la producción, partiendo desde el diseño mecánico de maquinaria con implementación de sensores y actuadores, hasta la simulación de fabricación y manufactura de productos, siendo una herramienta para corregir errores o generar ajustes en los actuadores de los bancos de trabajo.

Este trabajo se centra en el desarrollo de un gemelo digital de un proceso industrial a pequeña escala. Con el modelo digital creado de una estación MPS 500 de FESTO, será posible poner en aplicación diversos aspectos fundamentales de los que se caracterizan un gemelo digital en sí, teniendo en cuenta los aspectos físicos.

ANTECEDENTES

Mayor parte de las actividades empresariales se sustentan en software. Ahora el foco está en la digitalización ininterrumpida de los procesos corporativos fundamentales. En el futuro, ninguna parte del proceso de creación de valor podrá existir sin su propio “halo digital”. El proceso comienza con las primeras ideas sobre un nuevo productor potencial y continua con la ingeniería de este, su fabricación, su puesta en servicio y su uso, mediante los nuevos servicios que se ofrece junto con el producto o en base a éste [1].

En cada una de estas etapas se puede obtener ventajas importantes por el hecho de “replicar” el comportamiento de los objetos físicos en un entorno virtual. Los datos del diseño se pueden digitalizar y, a partir de ellos componer un modelo con el que poder realizar simulaciones para determinar si el producto se puede fabricar, que tipo de problemas aparecerán, que niveles de producción se alcanzarán, etc. De manera inversa, la sensorización de los objetivos físicos reales una vez en operación proporciona información valiosa con la que perfeccionar los modelos e incluso predecir el comportamiento. En ambos casos se está hablando de un Gemelo digital.

El gemelo digital puede abarcar también a la copia virtual de una planta industrial o líneas de producción completa. Por lo tanto, también puede usarse el termino gemelo digital en un nivel superior de la cadena productiva como es a nivel de planta o célula de producción [2]. Es necesario tener claro, pues las ventajas que se pueden sacar al Gemelo Digital en uno u otro nivel son distintas, ya que la información resulta relevante a distintos niveles de la cadena productiva.

JUSTIFICACIÓN

La implementación de un gemelo digital corresponde a una estación Festo MPS 500, en el campo educativo, traerá consecuencias positivas, pues se aumentará eficiencia en los procesos ya que antes de ser puestos a prueba en el banco de trabajo podrán ser modelados virtualmente y se podrá prever cualquier error suponiendo que se apliquen los mismos ajustes tanto en el entorno físico como en el entorno virtual. Bajo este escenario se podrían probar las tareas de automatización en un entorno virtual, sin la necesidad de poner en riesgo la integridad de los equipos reales. Una vez se verifique el correcto funcionamiento del sistema de automatización se podrán descargar los programas sobre los PLCs reales.

Desde el punto de vista didáctico, este proyecto también aporta con la creación de herramientas para que los estudiantes puedan entrenarse en el ámbito de la programación de autómatas sin la necesidad de acudir al laboratorio. Esto puede resultar de gran utilidad ya que al momento en la universidad únicamente existe un ejemplar de cada uno de estos equipos.

OBJETIVOS

Objetivo general

Desarrollar un gemelo digital de las estaciones de manipulación y proceso del sistema de producción modular MPS 500 de Festo Didactic, utilizando herramientas informáticas especializadas que permitan el diseño en tres dimensiones y la automatización del sistema en conjunto

Objetivo específico

- Comprender la estructura, la funcionalidad, el detalle de los componentes y su interacción de las estaciones de manipulación y proceso de producción modular MPS 500
- Conocer y aprender a utilizar la herramienta informática Siemens NX para generar un entorno virtual en tres dimensiones de las estaciones de manipulación y proceso de sistema de producción modular MPS 500 de Festo.
- Desarrollar un programa de automatización que permita controlar a las estaciones virtualizadas utilizando un controlador industrial de la marca Siemens

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN A LOS GEMELOS DIGITALES

1.1 Industria 4.0.

Viéndose la necesidad de optimizar procesos y de mejorar la interacción humano-máquina, la industria actual se ha visto obligada a realizar cambios fundamentales en todas sus aristas, a manera de que en conjunto con las tecnologías de comunicación se pueda robustecer los procesos para generar mayor competitividad. Los factores detrás de un proceso industrial como el desarrollo de metodologías, la investigación, la actualización de normas del uso de nuevas tecnologías y el desarrollo de software, son considerados de alta importancia y utilidad para dar lugar a cadenas de producción auto gestionables.

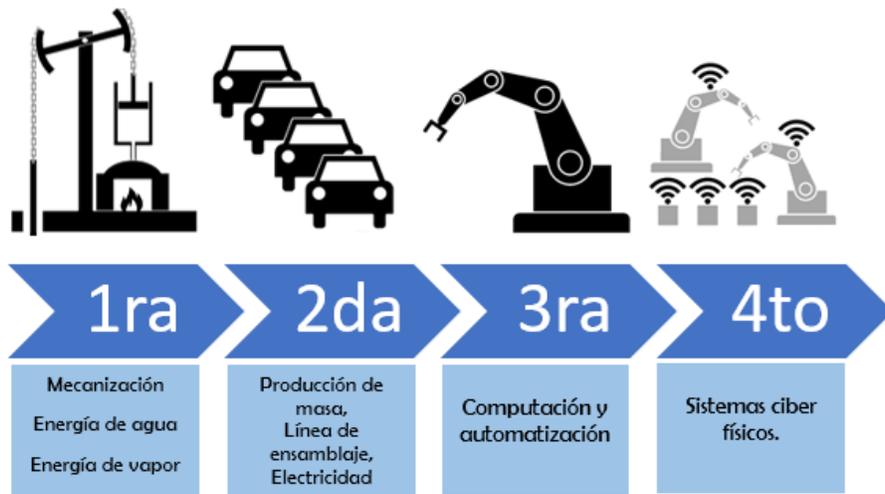


Figura 1. Descripción grafica de la línea de tiempo de la revolución industrial [1].

La Industria 4.0 (véase la **Figura 1**) se define como la cuarta etapa y la más importante que ha tenido el campo industrial desde el inicio de su revolución en el siglo XVIII. Se caracteriza por la función de tecnologías, rompiendo las barreras físicas, digitales y biológicas. Otra de las múltiples ventajas de la cuarta revolución, son los avances que conlleva en las distintas áreas como la robótica autónoma, la inteligencia artificial, el internet de las cosas, la biomedicina, entre otras. La cuarta revolución industrial tiene como objetivo principal automatizar y computarizar la mayor cantidad de procesos industriales posibles, de manera que el contacto humano máquina sea reducido, de tal manera que se pueda aumentar la precisión en los procesos y la calidad producción.

El invaluable alcance que está teniendo y tendrá la Industria 4.0, es el reflejo de la capacidad de operación que cada una de las tecnologías que surgen a raíz de esta implementación. Posteriormente, en la redacción

de este trabajo, se expondrá a detalle cada una de ellas a manera de poder interconectar y destacar sus funcionalidades en el área industrial. El objetivo principal que las entidades que cuentan con sistemas industriales 4.0 y entidades que están proceso de implementación, es fusionar las tecnologías contemporáneas con los procesos industriales de producción, mediante técnicas de automatización, virtualización y modulación.

Abordando el marco de la cuarta revolución industrial, vemos que, a más de la influencia de los campos tecnológicos, también refiere a influencias en ámbitos: sociales, económicos, políticos y culturales. Esto no tiene mucha novedad ya que, desde el principio de la revolución industrial en la segunda mitad del siglo XVII, se vio como una influencia en el entorno social, reformas económicas y políticas pues desde el periodo del neolítico esta fue catalogada como la reforma mundial de mayor importancia. Desde tal época, hasta la actualidad ha venido evolucionando y por ende los entornos antes mencionados, se van a ver afectados ya sea positiva o negativamente [2].

La industria va de mano con el marco social, entonces desde ahí arranca la primera justificación del “por qué” de esta cuarta revolución industrial. Si se analiza la cantidad de población con la que se contaba hace medio siglo atrás, se podrá ver un índice mayor de habitantes, por lo cual existe una mayor demanda de productos sin darle mucha importancia al uso que estos vayan a tener [3]. Por lo tanto, los procesos de fabricación se verán en la necesidad de aumentar su producción, es por eso que se requiere una automatización de los procesos industriales que permitan cumplir con las demandas de los productos para el usuario.

Por ende, la industria 4.0 surge como un paradigma que ayudará a conseguir procesos mayormente rápidos, flexibles y eficientes para cumplir con una mayor producción, sin perder la calidad y mejorando los costos.

1.2 Pilares de la industria 4.0

Al hablar de los pilares de la industria, se hace referencia a las tecnologías que son parte del funcionamiento de esta, que ayudaran en primera instancia a manejar datos, protegerlos y facilitar la comunicación entre dispositivos industriales. A continuación, desglosaremos a detalle cada uno de estos pilares.

a. Almacenamiento y análisis de datos.

En la actualidad, en los procesos industriales los datos se generan en cantidades exorbitantes. Estos deben ser procesados en segundos por lo que es imperativo contar con sistemas eficientes para su procesamiento y manejo.

En este contexto, aparece un término en inglés conocido como “Big Data”, el cual hace referencia a la gestión y analítica de datos. Generalmente se utilizan paquetes informáticos especializados, los cuales están basados en poderosos algoritmos y en su mayoría están diseñados para abordar problemas basados en la selección de características, permitiendo identificar patrones, mejorar la selección de procesos, descubrir inferencias. Todo esto conjugado con la inteligencia artificial permite realizar sistemas inteligentes capaces de predecir eventos futuros y tomar decisiones bajo escenarios complejos [4]. El procedimiento para incorporar este tipo de herramientas en los procesos va desde la recolección de datos hasta la visualización de estos. Un esquema funcional se puede observar en la *Figura 2*.

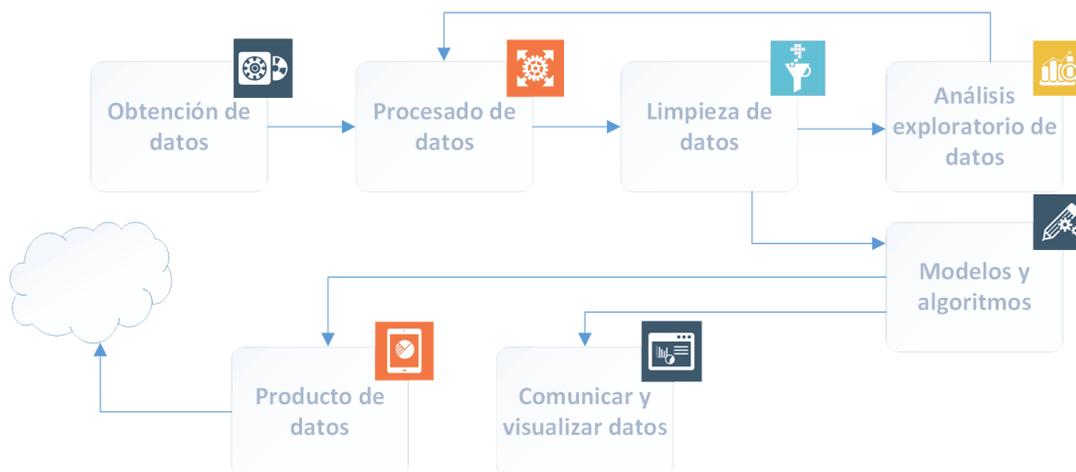


Figura 2. Procesamiento de Big Data [5].

b. Ciberseguridad

El término ciberseguridad se lo puede definir de varias maneras. Bajo el marco de la industria 4.0, la ciberseguridad se define como la organización, clasificación y jerarquización de recursos, procesos y estructuras que se utilizan para la protección de información en el ciberespacio y de los sistemas que este habilita de amenazas como ciberataques o cualquier otro evento que viole el uso de datos o información privada [6]. A continuación, se cita algunas ventajas que destacan al tener un sistema ciberseguro:

- Detectar y prevenir intrusos en la información que se maneja.
- Salvaguardar redes de comunicación entre dispositivos y la información que estos contienen, de software malicioso.
- Reduce el riesgo en ciberataques que se puedan dar a un software o incluso a los dispositivos físicos que conformen la red.

Uno de los métodos para prevenir ciberataques y filtración de información para los sistemas basados en internet como los de Industria 4.0, se lo denomina NNO (Oráculo de Red Neuronal) el cual es un algoritmo que se combina con otro conjunto de redes neuronales. El oráculo de redes neuronales consta de datos optimizados por algoritmos genéticos para su configuración. El algoritmo está basado en una base de datos llamada CUP99 para la detección de intrusos en el sistema inteligentes [7].

c. Computación en la nube

Es una tecnología que permite acceder remotamente desde cualquier lugar del mundo y en cualquier momento a aplicaciones, almacenamiento de archivos y procesamiento de datos, sin la necesidad de conectarse a un ordenador personal o servidor local. Esto, en el marco de la industria 4.0 facilita la interacción de varios usuarios en un proceso de fabricación. Como ejemplo, con el fin de fabricar una pieza el diseñador y el supervisor del proceso pueden interactuar desde distintos puntos o localidades con el fin de tener una retroalimentación al instante [8].

d. Internet de las cosas o IoT

IoT refiere a la interconexión de elementos electrónicos del diario uso de una persona, que permitirán un uso óptimo de los mismo y a su vez facilitan la vida diaria de los usuarios. Esta interconexión se logra gracias a los sistemas embebidos que actualmente todos los dispositivos electrónicos cuentan. Todo equipo es creado para cumplir una tarea o varias específicas, el objetivo de la IoT es crear un vínculo entre uno o varios equipos de tal manera que sus sistemas estén vinculados y adaptados al entorno del área del usuario en tiempo real [9].

Bajo el contexto de la industria 4.0, aparece el término IIoT que significa en castellano, Internet Industrial de las Cosas. Este paradigma permite mejorar la interacción entre los componentes de la automatización y el humano, inclusive de manera remota.

e. Inteligencia artificial o IA

Se define como la habilidad que poseen los dispositivos electrónicos para hacer actividades autónomas que por lo general requieren de intervenciones humanas. Esto se logra gracias al aprendizaje de máquina basado en redes neuronales, es decir que un dispositivo viene programado para ir aprendiendo constantemente y cumplir su finalidad gracias a lo que se denomina entrenamiento de redes neuronales.

La inteligencia artificial en esta cuarta revolución industrial refiere a la simulación de procesos de inteligencia humana por parte de las máquinas. Como ya se mencionó antes, la implementación de industria

4.0 no solo será para la creación de procesos industriales inteligentes sino también encamina a la creación de productos inteligentes, dichos productos están determinados a funcionar bajo normas de IA, para saber a qué modulo debe ir, como va a ser utilizado, de qué manera va a ser su fabricación, etc. , todo esto en base a procesos de aprendizaje que a su vez tienen como raíz una retroalimentación constante que permite la optimización y eficacia a la hora de tomar decisiones [10].

f. Robótica autónoma

Los robots se están volviendo mayormente autónomos y cooperativos. Existe una clara tendencia a desarrollar sistemas inteligentes para estos mecanismos para que interactúen entre sí de mejor manera, pero también interactúen con los humanos y aprendan de ellos. Se utiliza un robot autónomo para realizar el método de producción autónoma con mayor precisión y también trabajar en los lugares donde la mano de obra humana le cuesta operar o contempla riesgos. Los robots autónomos pueden completar una tarea determinada de manera precisa e inteligente dentro del límite de tiempo dado y también se centran en la seguridad, la legibilidad, la versatilidad y la colaboración [11].

Para la industria 4.0 la integración de métodos que permitan la autonomía total o parcial de procesos puede aportar mayores beneficios en cuanto a disminución de costos.

g. Realidad aumentada

La realidad aumentada es un recurso tecnológico que nos permite incorporar elementos visuales a la realidad para ofrecer experiencias interactivas al usuario, con la utilización de dispositivos digitales que normalmente son gafas o cascos ya que esta este recurso está enfocado en su mayor parte en el ámbito visual. Bajo el marco de la industria 4.0 la realidad aumentada está centrada en ofrecer un mejor control de la información de la industria y una mejor organización en general, sobreimprimiendo instrucciones en el campo visual del operario [12], como consecuencia obteniendo diferentes beneficios en diferentes puntos dentro de la industria:

- Formación y proceso de aprendizaje de nuevos operarios, al permitir interactuar de mejor manera con diferentes máquinas y dispositivos que se encuentran dentro de la industria sin necesidad de manuales físicos u otro medio físico de aprendizaje.
- Pre visualización y etiquetado de sistemas logrando disponer de información en tiempo real de todos los componentes, partes y hasta situaciones mediante archivos multimedia que pueden surgir en un proceso.

h. Gemelos digitales

Se definen como las réplicas virtuales dinámicas de procesos o productos físicos, de la mano de otras tecnologías como la IoT, Big Data e IA [13]. Un gemelo digital consiste básicamente en una representación virtual de un sistema o proceso físico, contemplando sensores y transductores que permitan al dispositivo virtualizado mantener un monitoreo en tiempo real o utilizar herramientas de almacenamiento en línea como la nube, para que puedan ser procesados los datos de manera remota desde donde el usuario se encuentre.

La implementación de esta modalidad virtual ha desencadenado varias consecuencias positivas. Una de ellas es la posibilidad de simular líneas de producción completas disminuyendo la probabilidad de errores sobre los componentes reales. Esto gracias a que los programas de automatización podrán ser fácilmente probados sobre el gemelo digital sin la necesidad de interactuar con el proceso real, arriesgando sus componentes.

1.3 Gemelos digitales en el contexto industrial

Teniendo en cuenta que el objetivo de este trabajo es la realización de un gemelo digital de un proceso de fabricación didáctico, en esta sección se abordará más ampliamente esta temática haciendo énfasis en las herramientas disponibles en el mercado y que son de utilidad para la creación de gemelos digitales.

Los gemelos digitales simplifican la toma de decisiones en el diseño de nuevos productos. Permiten eliminar el procedimiento basado en prueba y error, debido a que antes de ejecutar la automatización en las estaciones físicas, se pueden hacer pruebas sobre el gemelo digital y realizar las modificaciones necesarias.

Actualmente se puede encontrar varias herramientas de distintos fabricantes para la creación de gemelos digitales. A criterio personal, los fabricantes que más están teniendo influencia en el mercado son: General Electric, IBM, Bosch, Siemens, PTC, Azure Digital Twin de Microsoft y Autodesk Tandem.

Todos los fabricantes mencionados anteriormente tienen como factor común el poder utilizar modelos CAD en 3D realistas, basándose en características físicas detalladas del físico del sistema. A continuación, se hace un breve abordaje de estas herramientas.

- **Ciros Studio**

Festo Ciros Studio es una herramienta de trabajo profesional para crear modelos de simulación para uso industrial. Esta herramienta unifica en un mismo entorno simulación, modelización y programación. Cuenta con modelado y simulación 3D en tiempo real de entornos complejos, inmersivos y virtuales. Una de las

ventajas es que cuenta con una versión académica la cual tiene ciertas limitaciones comparándola con la versión completa.

Con la ayuda de este software en la creación de entornos industriales, se podrá crear una planificación detallada para la operación de los entornos industriales. Se podrá analizar paso a paso el desarrollo e interacciones entre la programación de PLC y sus actuadores, con el fin de poder optimizar los procesos y mejorar los ciclos de trabajo [14]. En la **Figura 3** se muestra una vista panorámica del entorno de trabajo de esta herramienta.

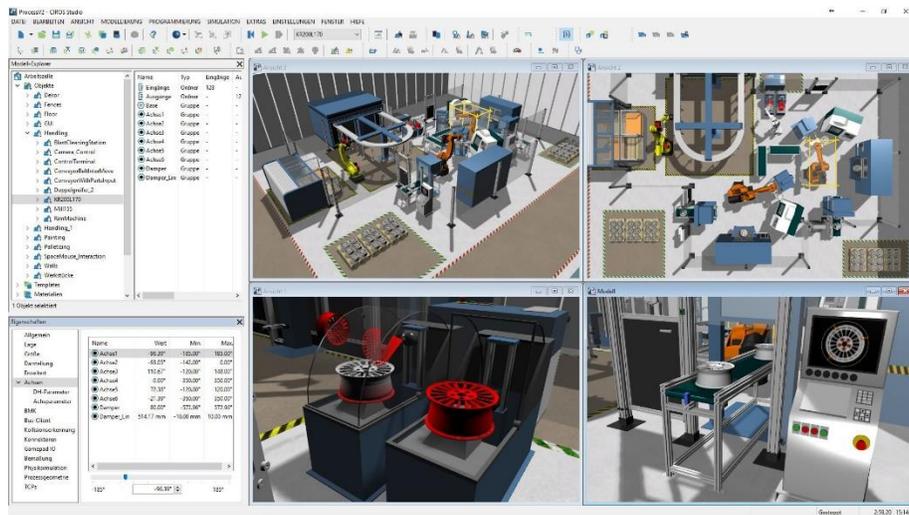


Figura 3. Interfaz del software Ciros Studio y modelamiento 3D del proceso de fabricación de Aros para llantas de un automóvil [15].

En el sector industrial, Ciros Studio es aplicado en el área automotriz, procesos de automatización, ingeniería mecánica de construcción, servicios de simulación e institutos de investigación. Con la llegada de la cuarta revolución industrial los sectores ante mencionados se complementan con:

- Implementación de gemelos digitales
- Planificación, diseño y mejoramiento de plantas industriales, fábricas y estaciones de trabajo.
- Enlace entre máquinas.
- Optimización en el ciclo de diseño
- Programación de robots autómatas.

Varias son las maneras en las que se puede utilizar y conectar varios controladores de software ya conocidos en el sector dedicado a los procesos de automatización, tales como: TIA Portal, Codesys, SoftPLC entre otros.

- **Factory I/O**

Factory I/O es una herramienta amigable y de fácil utilización. Fue creada por Real Games y permite construir y controlar procesos industriales en tiempo real, ofreciendo gráficas de alta calidad y sonido. Esto permite contar con un entorno muy realista y atractivo que puede ser controlado por equipos externos. La construcción de procesos se centra en el uso de cintas transportadoras y células de fabricación, tal y como se puede ver en la **Figura 4**, aunque es posible utilizar otros componentes para generar procesos continuos. Permite conectividad con una amplia gama de PLCs físicos, pero también se pueden utilizar PLCs virtuales, como por ejemplo los de SIEMENS, gracias a la utilización de PLCSIM o PLCSIM Advanced [16].



Figura 4. Simulación 3D de una línea de producción con bandas transportadoras, células de fabricación, brazos robóticos y sistema de mandos [17].

- **Automation Studio**

Esta herramienta se diferencia de las anteriores ya que únicamente permite simulaciones en 2D. Lo atractivo de esta herramienta es que se puede vincular a software de terceros (por ejemplo, Unity 3D) para poder generar un efecto más real de gemelo digital. Automation Studio cubre todas las necesidades en simulación de sistemas hidráulicos, neumáticos y eléctricos. Además, permite desarrollar automatismos e interacción humano máquina, así como se puede observar en la **Figura 5** una simulación 2D de un proceso industrial con electroválvulas y cilindros neumáticos. También facilita un esquemático en lenguaje KOP con el fin de poder revisar la programación para sensores y actuadores del sistema.

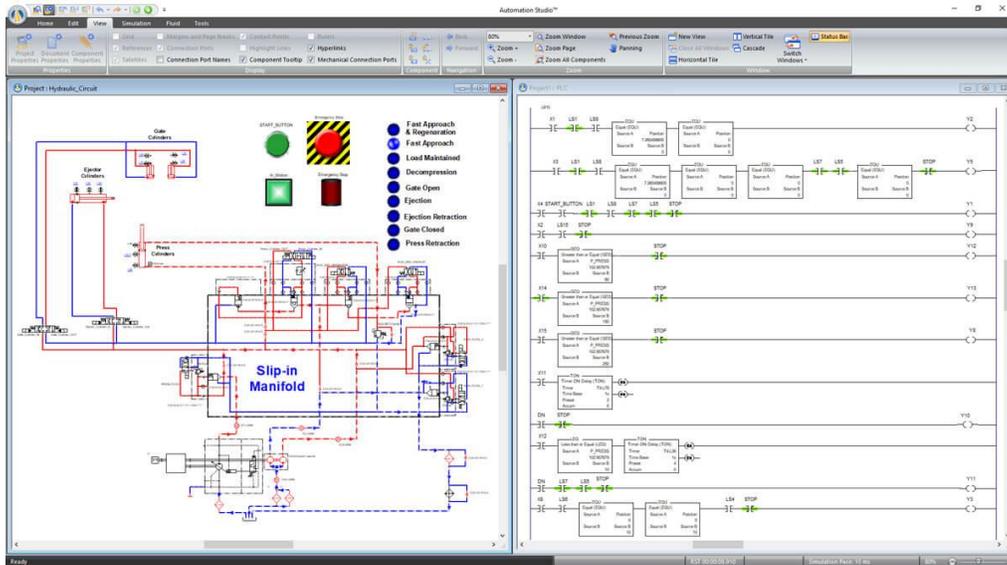


Figura 5. Vista de interfaz y ejemplo de simulación en PLC con el uso de la herramienta Automation Studio [18].

- **Plant Simulation**

Es un software desarrollado como parte de las soluciones al modelado de fabricación digital de Tecnomatix de Siemens PLM Software, destinado a la simulación jerárquica de procesos de eventos discretos, orientado a objetos de sistemas de producción y logística. Una vez puesta en marcha las simulaciones de los modelos industriales, concede al usuario la posibilidad de extraer las características del sistema como: robustez, eficiencia, tiempos de ejecución, etc., de tal manera el programador podrá optimizar el rendimiento de este.

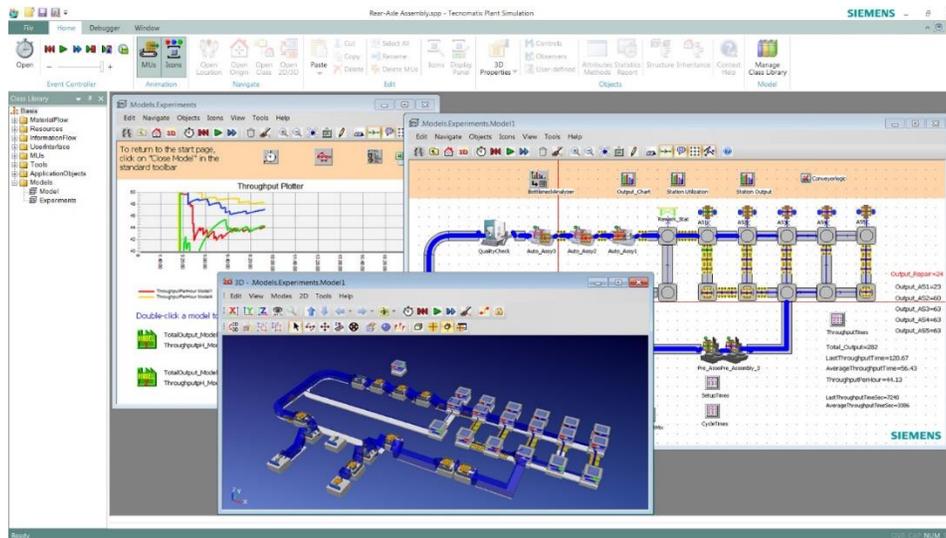


Figura 6. Interfaz de software Plant Simulation [19].

La característica principal de Plant Simulation, destaca en el modelo jerárquico de simulación, esto hace referencia a que los objetos secundarios pueden heredar comportamientos y atributos a partir de objetos primarios, con la finalidad de realizar una comunicación con mayor flexibilidad entre los distintos componentes del sistema [20]. Entre las múltiples facilidades que ofrece el software podemos destacar:

- Accesibilidad a objetos de bibliotecas estándar, así como también la opción de personalizarlas.
- Simulación interactiva 2D y 3D (**Figura 6**).
- Analisis grafico de los procesos implementados.
- Algoritmos genéticos y redes neuronales.

- **Unity 3D**

Unity 3D es un software que aparece como alternativa al diseño 2D y 3D, el cual brinda facilidades al usuario con herramientas básicas, así como también herramientas avanzadas para usuarios expertos y que buscan mayor precisión al momento de comenzar el desarrollo de un proyecto a través de Unity 3D.

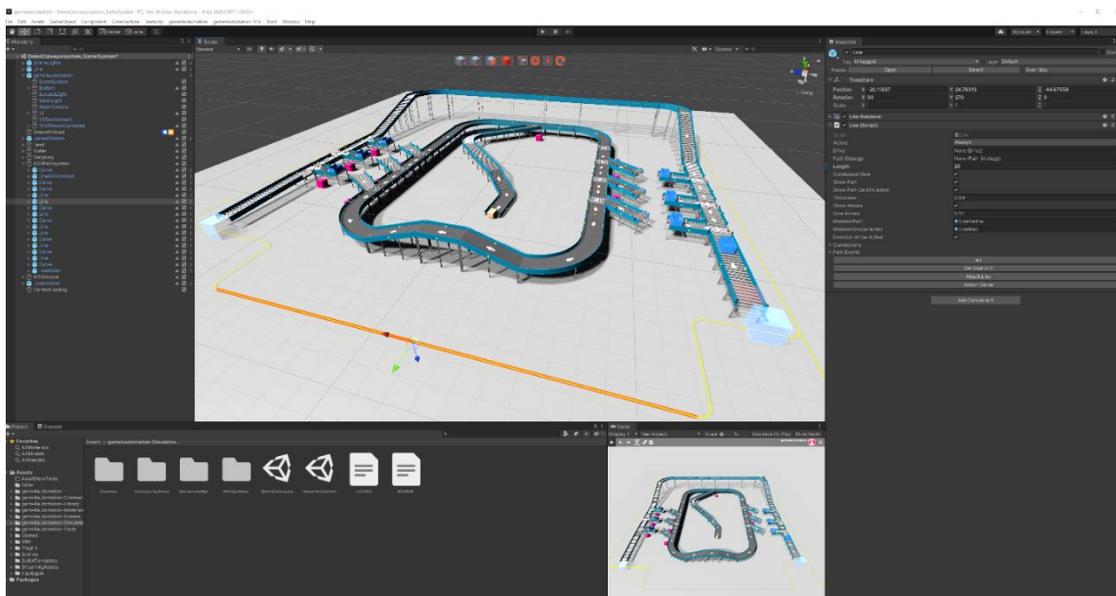


Figura 7. Desarrollo de un gemelo digital y simulación de un proceso industrial usando Game4Automation de Unity [21].

Considerado como un potente motor para el desarrollo de videojuegos, también se ha convertido en un potente software para el desarrollo de gemelos digitales y de gran ayuda para el sector industrial gracias a la herramienta Game4Automation permitiendo desarrollar simulaciones, realidad aumentada, y realidad virtual, así como se puede observar a la **Figura 7**. Game4Automation permite únicamente acceder de manera completa a sus entornos de desarrollo en su versión paga, el cual incluye acceso completo a sus componentes para la creación de gemelos digitales con interfaces de CAD [22].

CAPÍTULO 2 MARCO METODOLÓGICO

Con el concepto de gemelo digital y las herramientas existentes de virtualización introducidas en la *Sección 1.3.*, en este capítulo se presenta de manera detallada las herramientas escogidas y utilizadas para este proyecto:

- Siemens NX 12 Diseño de concepto de mecatrónica (MCD) utilizado en la parte de virtualización de las estaciones.
- TIA Portal V15 utilizado para el desarrollo del programa de control del PLC.
- PLCSIM Advanced como herramienta de simulación del PLC.

Se debe destacar que todos los programas informáticos seleccionados para este proyecto pertenecen a la marca Siemens, lo cual facilita la interconectividad y la comunicación entre ellos.

2.1 Siemens NX 12

Siemens NX es un software de diseño para cumplir tareas en las áreas de Diseño Asistido por Computador (CAD), Manufactura Asistida por Computador (CAM), Ingeniería Asistida por Computador (CAE) y la Gestión de Datos del Producto o PDM, aumentando la eficiencia de los procesos y el desarrollo de productos en la industria.

Siemens NX se presenta como una herramienta para contribuir con el desarrollo de datos y manejo del producto. Pertenece a la matriz de Siemens PLM o Gestión de Ciclo de Vida del Producto [23], brindando una amplia y muy completa funcionalidad para el desarrollo de técnicas de producción como:

- **Tecnología síncrona**

En Siemens NX la tecnología síncrona permite a los usuarios interactuar con creaciones, cambios o actualizaciones del diseño de un modelo, así como también trabajar en los aspectos antes mencionados de varios modelos que pertenezcan a un mismo conjunto [24]. De tal manera que se puedan reutilizar datos, y volverlos a trabajar en otros modelados o también trabajarlos de manera simultánea en datos multi-CAD, teniendo así una colaboración perfecta con proveedores y socios.

- **Automatización basada en el conocimiento**

Son procesos en los que se van recopilando bases de datos para que puedan ser utilizadas en el futuro, en procesos similares o que den raíz a otros procesos. Se aplica métodos de aprendizaje no supervisado, es decir, a medida que se va realizando cierto proceso, los componentes implicados van guardando datos y los mezclan con datos de otros sectores u otros procesos con el objetivo de que la red vaya adquiriendo información para futuras operaciones [25].

- **Innovación del proceso**

Los procesos se vuelven óptimos y pueden ser integrados a los trabajos diarios de cada equipo de la red, basados en el e-learning, a manera de que cada sistema va compartiendo datos sin necesidad de que un operario programe cada instrucción a la máquina, sino estas van adquiriendo los valores de procesos anteriores que se van cargando en una nube compartida de base de datos.

- **Simulación del ciclo de vida**

Implementa pruebas en los productos con el fin de que, al usuario final del mismo, se le sea entregado un producto de calidad, cumpliendo todos los estándares establecidos e incluso con características técnicas del producto.

NX en el marco de la industria 4.0 suministra grandes aspectos para la automatización y digitalización de procesos como:

- Resolución robusta y eficaz del problema mediante el uso de herramientas de CAD, CAM y CAE. Se puede ofrecer solución a ciertas problemáticas que surgen a través del desarrollo de productos, con funcionalidades de diseño interactivo con el fin de poder modelar geometría compleja que en ocasiones también representa un problema.
- Flexibilidad en el manejo de software para que se puedan implementar técnicas de modelado de cualquier tipo, basadas en las restricciones con el modelo directo. El software implementado de Siemens NX proporciona un entorno unificado de desarrollo con el fin de compartir información entre módulos y de tal manera que se pueda reducir tiempos de ciclo en la producción.

Siemens NX optimiza la productividad desde el diseño conceptual de los mismos hasta la manufactura o producción, en los que se pueden aprovechar datos de varios sistemas CAD para que puedan ser implementados en los procesos de diseño, análisis y producción del producto final [26].

Los productos NX no solo permite trabajar bajo el entorno de Siemens, sino que también se pueden implementar funcionalidades de diversas plataformas como Windows, Linux, etc.

2.2 Siemens NX 12 MCD o Diseño de concepto de electrónica

Es una solución que se presenta por parte de Siemens para la integración de distintos procesos, reutilización de datos, reducción de tiempo de producción y análisis previo a la ejecución física de la producción, con el fin de que esta sea optimizada.

Utiliza los principios de integración de varias disciplinas como la ingeniería de control, la mecánica, tecnologías de la información, inteligencia artificial, la ingeniería eléctrica y la ingeniería electrónica, con el objetivo de poder simular varios criterios y alternativas antes del proceso o ciclo de desarrollo de fabricación de un producto [27].

Empezando desde la creación de un modelo básico en el cual podremos definir articulaciones, para poder especificar un movimiento sobre tal articulación.

- **Utilidades**

La herramienta MCD de Siemens NX es de fácil uso, para usuarios al tanto de diseño mecánico o incluso que estén familiarizados con otras plataformas, pues lo que permite el MCD es que se podrá ver el comportamiento de un sistema a la par con el sistema mecánico [27].

Todas las definiciones del mundo físico como la cinemática, dinámica, objetos de colisión, comportamiento de sensores y actuadores además de la mecánica de resortes pueden ser aplicadas en los modelos creados y aplicados con el MCD.

Permite también observar como la maquina diseñada trabajaría en tiempo real, es decir para ver el comportamiento de la maquina bajo parámetros reales, podremos aplicar fuerzas externas al diseño de maquina mientras la simulación se está ejecutando, esto permite simular las cargas reales que se hagan a los modelos ya en el mundo físico.

Al utilizar el MCD, el software soporta el flujo y mecánica de materiales de varios objetos a la vez, por tal razón mientras se esté ejecutando alguna simulación, se pueden introducir nuevos objetos para aumentar la realidad de la simulación [27].

Durante la simulación el uso de la aplicación de conceptos de diseños de mecatrónica, se pueden observar los parámetros físicos que interactúan en el diseño mecánico usando el inspector.

- **MCD en el flujo de trabajo**

El diseñador de conceptos de mecatrónica de Siemens NX, al ser diseñado para interpretar y visualizar aspectos mecánicos, eléctricos e incluso de fluido, es necesario cumplir una serie de pasos (Revisar la *Figura 8.*), los cuales ayudaran a conseguir un proceso mayormente organizado, garantizando así su funcionalidad y su flexibilidad al momento de realizar mantenimientos preventivos o correctivos.

A continuación, se presentan los pasos para el flujo de diseño de trabajo [27].

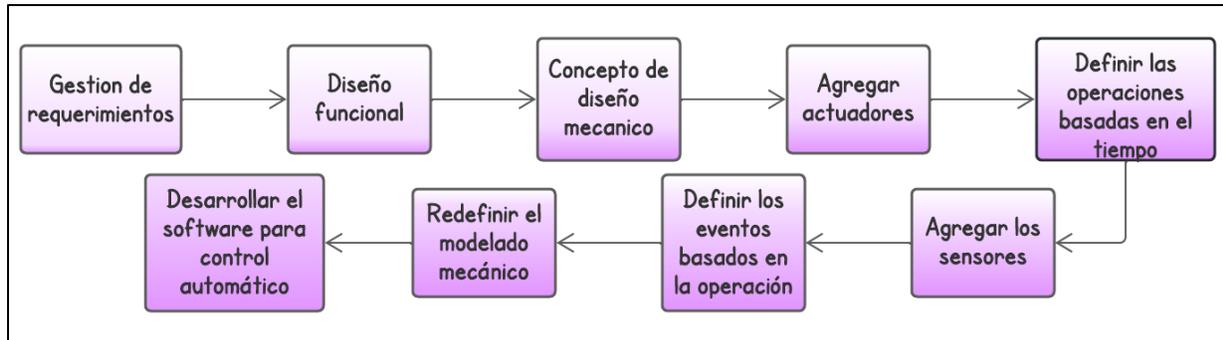


Figura 8. Flujo de diseño de trabajo MCD

Gestión de requerimientos: Este es el primer paso en el cual se trata de sacar todos los requerimientos que debe cumplir el diseño, tanto en software y hardware. En caso de que el ensamble final cuente de subsistemas, se recomienda también definir los requerimientos también para cada subsistema.

Diseño funcional: Se deben definir las funciones que va a tener cada componente del sistema, luego las mismas deberán ser jerarquizadas basándose en la operación final del sistema. También se debe procurar en establecer alternativas para el diseño. En cuanto al diseño funcional también requiere realizar el diseño de un boceto en base a los requerimientos y a las funciones asignadas a cada componente, tomando en cuenta las orientaciones y la ubicación de cada sistema y subsistema que componen el diseño.

Concepto de diseño mecánico: Realizar el modelado 3D del boceto para los sistemas y subsistemas esquematizados previamente, como una tentativa para el diseño del ensamble final. Asignar las propiedades mecánicas a los componentes además de las características dinámicas y cinemáticas para el movimiento de cada componente.

Agregar actuadores: Agregar los respectivos componentes de actuación del sistema tomando en cuenta la ubicación de estos en el ensamble para evitar interferencias. Se debe tener en cuenta al momento de definir los actuadores, las restricciones que estos van a tener ya sean de velocidad o de posición.

Definir las operaciones basadas en el tiempo: Este paso hace referencia a que se deben establecer los parámetros bajo los cuales los actuadores serán controlados. Jerarquizar las operaciones de cada actuador en base a la secuencia que se plantee en los requerimientos de funcionalidad del diseño del sistema. Añadir la secuencia establecida para cada componente al árbol del proyecto.

Agregar los sensores: Agregar los sensores que estarán presentes en diseño del sistema, teniendo en cuenta la ubicación estratégica en el ensamble. Los sensores serán activados por la colisión o contacto con elementos del sistema.

Definir los eventos basados en la operación: Establecer que eventos que serán generados luego de la activación de los sensores, relacionando los eventos con los actuadores colocados previamente. Agregar las acciones establecidas en el árbol del proyecto relacionando sensor con el actuador o los actuadores correspondientes.

Redefinir el modelado mecánico: Redefinir el modelado 3D planteado inicialmente, tomando en cuenta los errores observados al establecer las secuencias de operación de los sensores y actuadores. Establecer la geometría adecuada y detallada para el movimiento de los componentes del diseño mecánico, usando herramientas de diseño CAD. Relacionar las geometrías necesarias para cada pieza con la ayuda de restricciones de posición en el ensamble, de manera que no existan interferencias entre la formación de cada pieza o componente.

Desarrollar el software para control automático: Finalmente, una vez definidas las restricciones geométricas, se deberá programar la automatización en un PLC, utilizando cualquier software que pueda ser compatible y se pueda habilitar para configuración de simulación online, en este caso, para Siemens NX, el software mejor compatible es TIA Portal, desarrollado por Siemens. Es preciso contar también con un software capaz de hacer un enlace red usando la tarjeta de red del ordenador, para este caso también Siemens tiene un software que usa la tarjeta de red del computador para crear una conexión ethernet virtual. PLCSIM Advanced al ser activado, actúa como un PLC el cual establece conexión con TIA Portal, y permite que el software Siemens NX reconozca las variables externas para que así se puedan hacer el mapeado de las mismas.

2.3 TIA Portal

Es un sistema de ingeniería que permite mediante un lenguaje de programación, realizar la configuración de procesos de planificación y producción con autómatas programables o paneles HMI de la marca Siemens [28]. El software TIA Portal proporciona varias herramientas al usuario dentro del mismo entorno de trabajo, lo cual ayuda al programador a invertir de manera eficaz su tiempo mientras desarrolla la debida

programación, así mismo en al momento de poner en funcionamiento el código desarrollado, permite realizar corrección de errores de manera sencilla tanto al momento de ejecutar cambios como al momento de ubicar los cambios a realizar.

TIA Portal permite a sus usuarios la posibilidad de integrar distintas aplicaciones para el desarrollo de proyectos de automatización para la industria. Deja al usuario la posibilidad de simular la programación usando paquetes de simulación de entornos virtuales, pudiendo realizar el análisis de cada bloque de programación. Por otra parte, esta herramienta permite el diseño personalizado, didáctico e intuitivo de paneles HMI. Entre otras cosas, Permite a los usuarios vincular varios proyectos con la ayuda de la nube de TIA Portal, para compartir información entre autómatas, facilitando la adquisición de datos por parte del o los autómatas que se encuentren dentro del proyecto.

2.4 PLCSIM Advanced

PLCSIM Advanced es una herramienta capaz de emular virtualmente las funciones de un autómata programable de la marca Siemens, para más especificación, controladores de la serie S7-1500 y ET 200SP. La ventaja del manejo de esta herramienta proporcionada por el fabricante Siemens es que no se necesita específicamente un controlador real para poner a prueba y evaluar el comportamiento de un programa [29]

Esta característica aplicada en el entorno industrial es de gran utilidad ya que ayuda a disminuir errores al momento de la manufactura o proceso, pues previamente se puede hacer simulaciones, para analizar y parametrizar factores para que los productos cumplan con estandarizaciones y requerimientos establecidos [30]. Ayuda también al momento de detección y corrección de errores, proporcionando seguridad al momento de transferir el algoritmo al sistema en el controlador real, sin necesidad de ocasionar daños provocados por errores en el mismo.

La herramienta PLCSIM ADVANCED ha sido de gran ayuda en la vinculación del fabricante Siemens a la industria productora, y los cambios que esta ha venido teniendo con la aparición de las nuevas tecnologías relacionadas a un entorno virtualizado.

- **Diferencia entre una CPU simulada y real**

La diferencia es bastante notable, pero haciendo énfasis en las más importantes, cabe recalcar que una CPU simulada puede emitir parámetros exactos asumiendo y no teniendo en cuenta los distintos factores físicos de hardware, factores que ya llevando el algoritmo a ser ejecutado en el entorno físico pueden influir en la obtención de datos o también alterando así sea mínimamente el proceso.

Otra diferencia para destacar es que una CPU simulada al presentar errores en su código de programación no pasara ningún daño físico con los componentes reales, simplemente se localiza el error y se vuelve a cargar el algoritmo. A diferencia que una CPU real representa un gasto de energía además de posibles daños en la estructura física del sistema que la CPU controle.

2.5. Descripción de funciones de Siemens NX MCD

A continuación, se realiza una descripción funcional de las herramientas de Siemens NX MCD para la creación de gemelos digitales a partir de modelos CAD. Se parte desde un modelo CAD de la maquina hasta llegar al modelo dinámico animado que se ha utilizado para la simulación [31].

2.5.1. Interfaz y menús

Siemens NX, al igual que varios programas tradicionales, posee la *Barra de recursos* al borde izquierdo y la *Cinta de opciones* en la parte superior (Revisar la **Figura 9**). A continuación, se detallará el contenido de estos componentes del entorno.

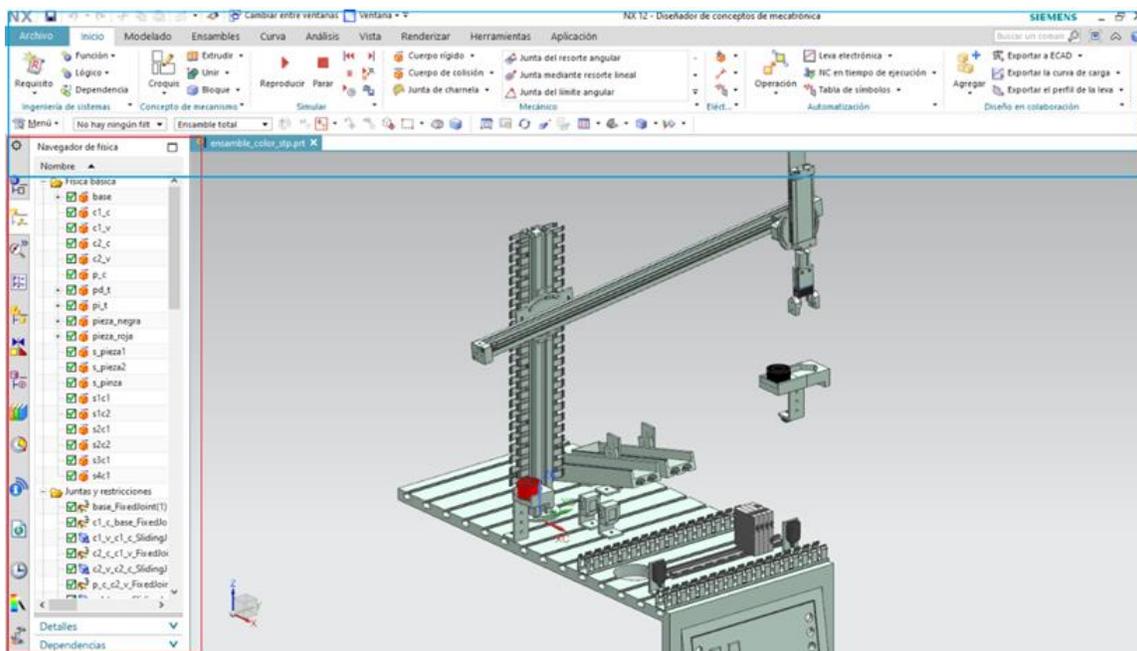


Figura 9. Barra de recursos (Recuadro rojo) y Cinta de opciones (Recuadro Azul) de Siemens NX Fuente: Siemens NX

- **Cinta de opciones**

La cinta de opciones se centra en todo lo que se va a “hacer” sobre el modelo. En el caso de este proyecto se va a utilizar el MCD de Siemens NX, en este sentido, lo primero que se debe hacer es habilitar esta aplicación, para ello se debe seguir la siguiente ruta:

- **Barra de recursos**

En la barra de recursos se encuentra todo lo relacionado al modelo que se está trabajando. Aquí se encuentran todos los elementos creados y editables, además de valores de los elementos que tengan salidas numéricas o booleanas. Dentro de la barra de recursos existen diferentes pantallas que por su función es necesario explicarlas:

Navegador de física

Aquí observamos los elementos creados, los cuales que se van agrupando de forma automáticamente según su función, por ejemplo: *Control de posición*, *Control de velocidad*, *Interruptor limitador* dentro de la carpeta de *Sensores y actuadores* (**Figura 10**).

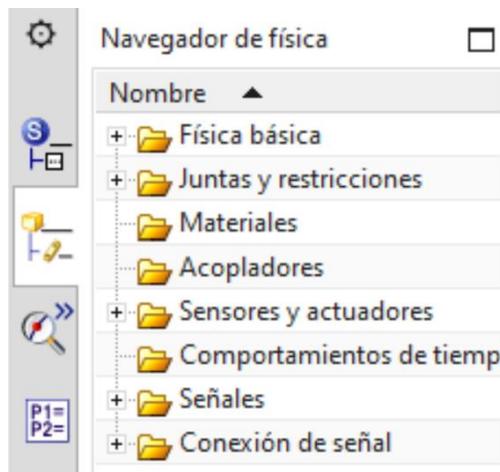


Figura 10. Navegador de física de Siemens NX Fuente: Siemens NX

Cabe aclarar que sí, se necesitan detalles, editar, deshabilitar o eliminar una pieza se puede acceder con un clic izquierdo sobre la pieza.

Navegador de ensamble

En esta pantalla (**Figura 11**) se observan todos los elementos CAD que conforman el modelo. El mismo viene estructurado en forma de árbol de forma que se pueda trabajar a distintos niveles de ensamble en el modelo.

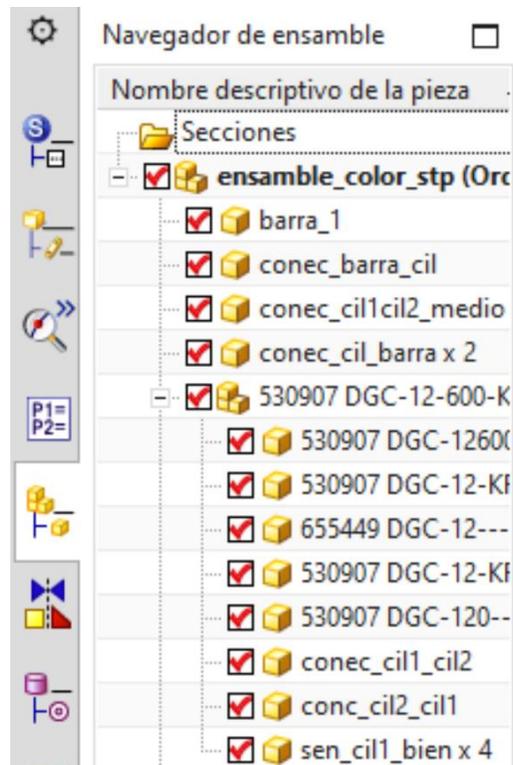


Figura 11. Navegador de ensamble de Siemens NX Fuente: Siemens NX

En este menú una función a resaltar es la de *Ocultar*, esta nos permite ocultar la pieza en la simulación sin que este deje de cumplir su función dentro del modelo.

Inspector de tiempo de ejecución

Esta pantalla (*Figura 12*) está centrada en la simulación. Aquí se pueden observar y forzar las variables que genera el modelo durante la simulación. Para añadir o eliminar se debe dar clic sobre la variable y seleccionar la opción deseada.

Editor de secuencia

Esta pantalla (*Figura 13*) es la más importante antes de pasar a la programación del modelo de manera externa debido que en esta podemos programar en función de condiciones o de tiempo, las operaciones para ver su ejecución en el modelo.

Inspector de tiempo de ejecución

Inspector Gráfico Instantánea

Física	Gráfico	Expo...	Valor	Unidad
[-] pos_cil1				
[-] eje			c1_v_c1_c_Slidi...	
[-] velocidad	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	100.000000	mm/s
[-] posición	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0.000000	mm
[-] activo			true	
[-] aceleración límite			false	
[-] aceleración	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0.000000	mm/s ²
[-] desaceleración	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0.000000	mm/s ²
[-] sobreaceleración límite			false	
[-] sobreaceleración	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0.000000	mm/s ³
[-] sobrecarga			false	
[-] fuerza				
[-] x	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0.000000	N
[-] y	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0.000000	N
[-] z	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0.000000	N

Figura 12. Inspector de tiempo de ejecución de Siemens NX Fuente: Siemens NX

Editor de secuencia

Nombre	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1 Root	[Barra de tiempo]								
2 pinza_d	[Barra de tiempo]								
3 pinza_l	[Barra de tiempo]								
4 pausa	[Barra de tiempo]								

Figura 13. Editor de secuencia de Siemens NX Fuente: Siemens NX

2.5.2. Elementos más utilizados

Siemens NX MCD cuenta con un motor físico para los cálculos de fuerzas, masas, inercias, colisiones etc. Para una simulación adecuada es necesario indicar que aceleraciones se tendrán en cuenta para el modelo. Para esto es necesario seguir la siguiente ruta:

Archivo > preferencias > diseñador de concepto de mecatrónica

Aquí la única aceleración externa fuera del modelo es en Z en que corresponde a la gravedad. No obstante, pueden existir casos donde se requiera analizar modelos dentro de un automóvil o en algún medio no fijo donde intervendrían diferentes aceleraciones. Para estos casos el menú de preferencias deberá ser debidamente configurado (Revisar la **Figura 14**). Por otra parte, con respecto a los parámetros del material si no se especifican el programa tomará los valores por defecto.

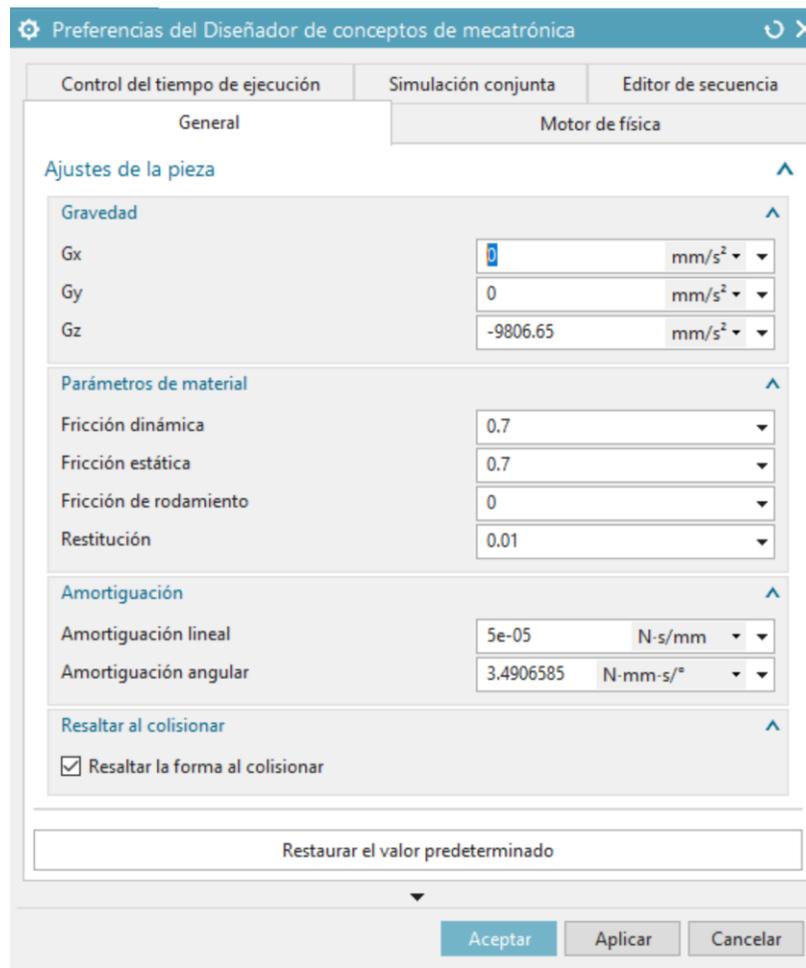


Figura 14. Preferencia del diseñador de concepto de mecatrónica de Siemens NX Fuente: Siemens NX

a. Elemento “Cuerpo rígido”

Es el elemento básico e impermissible en cualquier modelo (**Figura 15**). Los cuerpos rígidos experimentarán algún movimiento o actuarán bajo el efecto de algún esfuerzo o de las aceleraciones parametrizadas anteriormente.

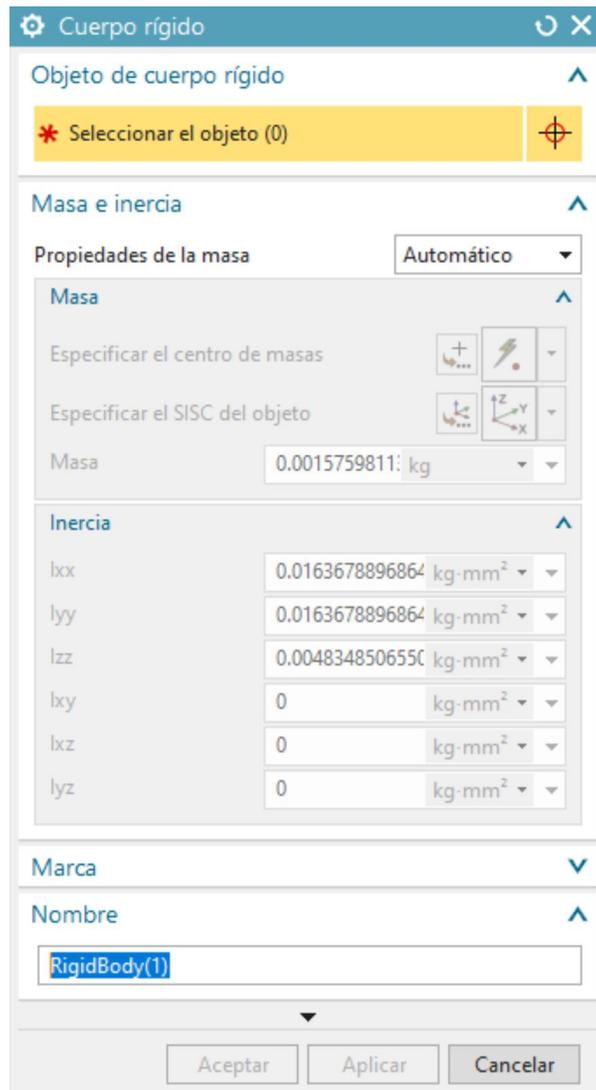


Figura 15. Manu de Cuerpo rígido de Siemens NX Fuente: Siemens NX

Como se puede ver en la **Figura 15** un *Cuerpo rígido*, Siemens NX MCD calcula de forma automática su centro de masa, así como su masa e inercias, utilizando su forma y volumen. También permite especificar los parámetros de manera manual si es que fuere necesario.

b. Elemento “Cuerpo de colisión”

Como *Cuerpo de colisión* se deben definir todos los elementos que sea imposible atravesarlos con otro cuerpo de colisión es decir que existe una colisión, con la consecuente transmisión de esfuerzos entre ambos.

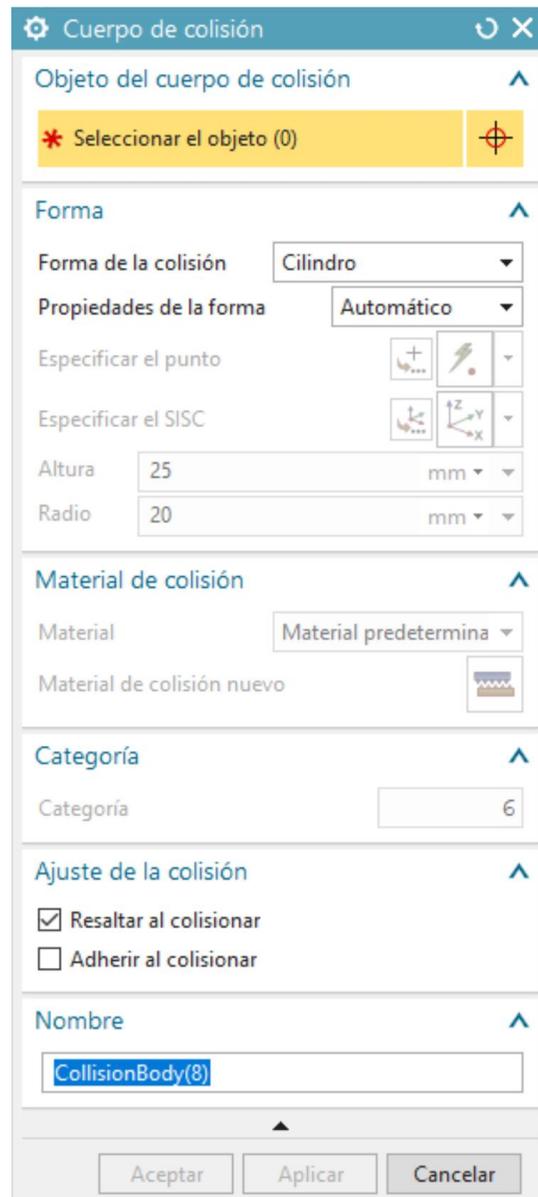


Figura 16. Menú de Cuerpo de colisión de Siemens NX Fuente: Siemens NX

Un aspecto importante es que los *Cuerpos de colisión* son los elementos que más recursos consumen en la simulación, pues cargan al motor físico con cálculos de todas las soluciones que producen entre ellos. Por esta razón hay que limitar los cuerpos de colisión a los necesarios para la simulación y buscar otros recursos

que dispone Siemens NX siempre que sea lo posible. Además, hay que resaltar dos opciones que permiten dar varias utilidades a un cuerpo de colisión (Revisar la **Figura 16**):

Material de colisión: Permite introducir un material distinto al cuerpo de colisión logrando que cuerpos similares en forma actúen de diferente forma con su ambiente.

Categoría: Esta opción permite generar colisiones entre cuerpos de las mismas categorías.

c. Elemento “Superficie de transporte”

Por lo general se aplica a una cara del cuerpo y da características de velocidad a los elementos que entren en contacto con esa superficie.

Se debe tener en cuenta que la cara del cuerpo que se quiere definir como *Superficie de transporte* como al cuerpo que va a estar en contacto con la misma, deben ser definidos como *Cuerpos rígidos* y *Cuerpos de colisión* caso contrario estos no podrán interactuar.

d. Elemento “Sensor de colisión”

Un elemento imprescindible en cualquier modelo a controlar son los sensores y en este apartado existe el sensor de colisión.

Cuando un elemento se define como *Sensor de colisión*, Siemens NX MCD detecta si algún cuerpo definido como *Cuerpo de colisión* entra en contacto con la superficie definida y entrega un valor en booleano que puede ser utilizado para programarlo de manera interna con Siemens NX o externa hacia otro software.

Como se ve en la **Figura 17**, el menú para crear un *Sensor de colisión* se parece al de un *Cuerpo de colisión*, donde seleccionamos un cuerpo y posteriormente la forma de colisión de tipo línea, que simulará un láser donde los cuerpos que interactúen con el mismo accionaran el sensor por ello debe ser configurado de la forma más lógica posible.

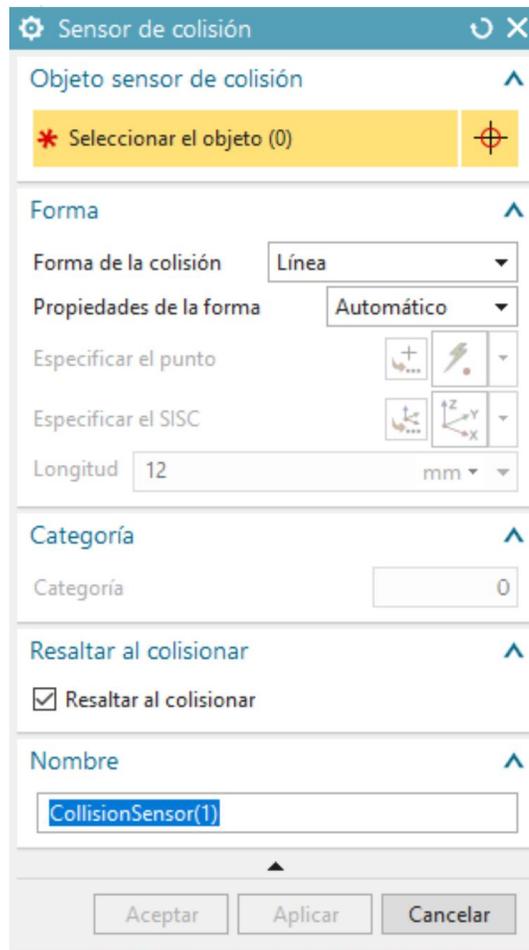


Figura 17. Menú de Sensor de colisión de Siemens NX Fuente: Siemens NX

e. Elemento “Fuente de objetos”

Un elemento básico si se va a trabajar con una máquina con un flujo de objetos constantes es la *Fuente de objetos* esta genera un cuerpo rígido determinado, con todas sus características.

Dentro del menú, el parámetro *Activador* es al que se debe configurar dependiendo de la programación o función que va a cumplir, ya que el mismo da dos opciones para generar el cuerpo rígido basado en un intervalo de tiempo o por activación como se puede observar en la *Figura 18*.

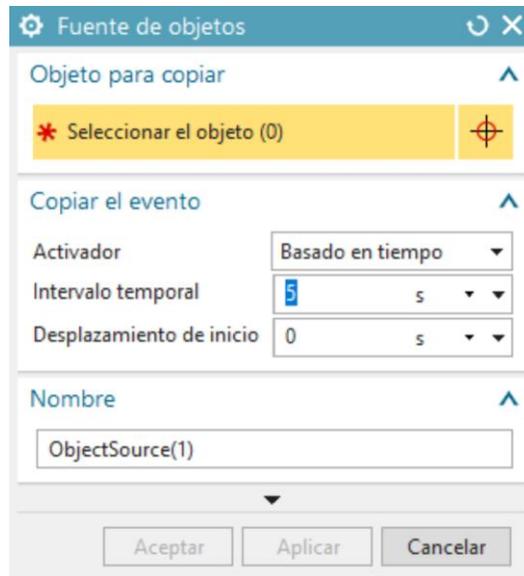


Figura 18. Manu de Fuente de objetos de Siemens NX Fuente: Siemens NX

f. Elemento “Junta fija”

Las juntas son elementos que sirven para restringir grados de libertad de los *Cuerpos rígidos* o vincula grados de libertad de unos *Cuerpos rígidos* con otros.

La *Junta fija* es la más sencilla ya que como su propio nombre lo explica fija la posición de un *Cuerpo rígido* determinado.

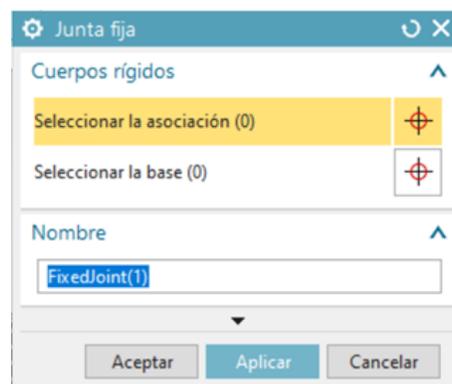


Figura 19. Menú de Junta fija de Siemens NX Fuente: Siemens NX

Como se puede observar en la **Figura 19** se debe especificar los dos cuerpos que deben fijarse o por su defecto seleccionar solo un cuerpo. También cabe aclarar que esto se puede dar tanto con dos cuerpos fijos, como con un cuerpo fijo y otro con movimiento.

g. Elemento “Junta deslizante”

La *Junta deslizante* restringe todos los grados de libertad de un *Cuerpo rígido* salvo en un eje que corresponderá a la translación.

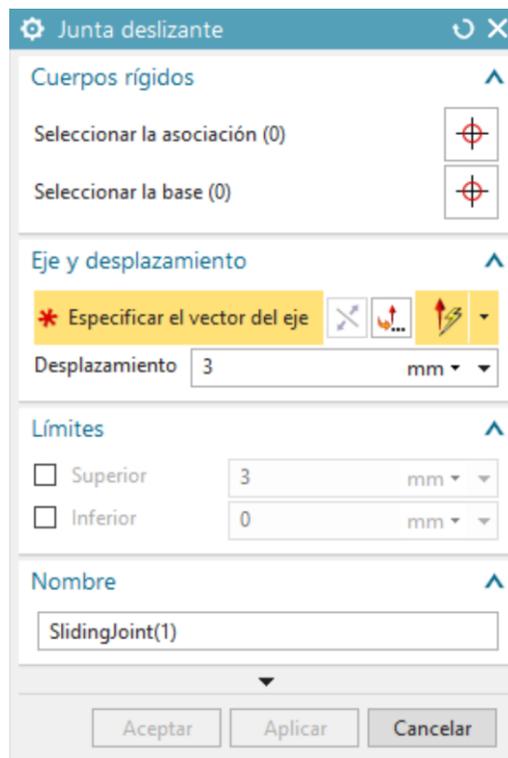


Figura 20. Menú de Junta deslizante de Siemens NX Fuente: Siemens NX

Similar a la *Junta fija* se debe seleccionar una base y un cuerpo de asociación siendo este al que se va a relacionar con el eje libre.

Dentro de las opciones (**Figura 20**) también es posible ajustar el desplazamiento de cuerpo asociado y de igual manera permite establecer límites que establecen la coordenada máxima y mínima que puede alcanzar el cuerpo asociado al eje libre.

h. Elemento “Junta charnela”

Es similar a la *Junta deslizante*, la diferencia radica es que el único grado de libertad es una rotación sobre un eje en lugar de un desplazamiento.

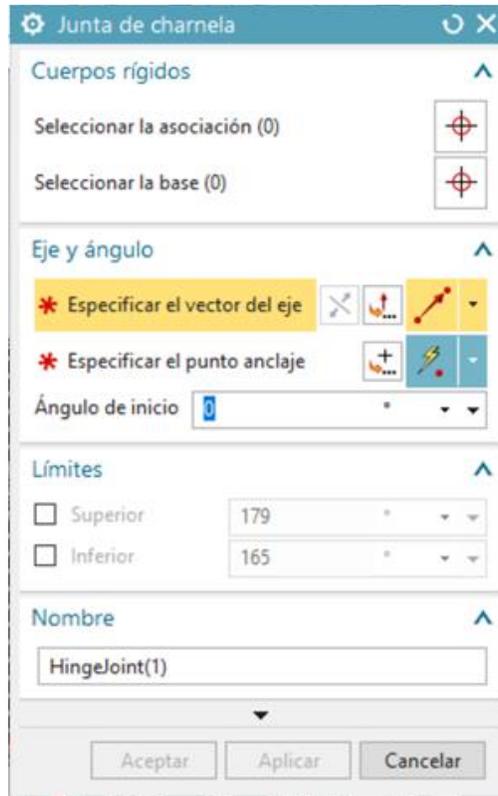


Figura 21. Menú de Junta charnela de Siemens NX Fuente: Siemens NX

Igual a todas las juntas, este puede ser asociado a una base o por defecto libre, con la diferencia que girará sobre el eje de la base o en caso contrario girará libremente sobre el eje establecido. También cuenta con un ángulo de inicio y límites, pero con la diferencia que estos se establecen con valores de ángulos como se puede ver en la **Figura 21**.

i. Elemento “Control de posición”

Siemens NX MCD entiende como elementos de control a los elementos que permiten controlar el valor de ciertas variables de los grados de libertad que se han establecido con las juntas anteriormente mencionadas.

El *control de posición* permite dar una posición a un grado de libertad, donde el cuerpo acelera hasta la velocidad indicada con las restricciones indicadas para después desacelerar hasta llegar a la velocidad nula en el punto de destino. Al añadirlo al *Inspector de parámetros* observamos el conjunto de variables

relacionadas a este parámetro, además de poder forzar precisamente el valor de posición como se puede ver en la **Figura 22**.

Física	Gráfico	Expo...	Valor	Unidad
[-] pinzad				
[-] eje			pd_t_p_c_Slidin...	
[-] velocidad	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	100.000000	mm/s
[-] posición	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0.000000	mm
[-] activo			true	
[-] aceleración límite			false	
[-] aceleración	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0.000000	mm/s ²
[-] desaceleración	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0.000000	mm/s ²
[-] sobreaceleración límite			false	
[-] sobreaceleración	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0.000000	mm/s ³
[-] sobrecarga			false	
[-] fuerza				
[-] x	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0.000000	N
[-] y	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0.000000	N
[-] z	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0.000000	N

Figura 22. Control de posición en la pantalla del Inspector de parámetros de Siemens NX Fuente: Siemens NX

j. Elemento “Control de velocidad”

El *Control de velocidad* es equivalente al *Control de posición* con la clara diferencia que los parámetros que se van a relacionar en este caso es la velocidad. El *Control de velocidad* permite dar una velocidad fija a un grado de libertad, donde el *cuerpo rígido* definido por un tipo de junta alcanza a la máxima aceleración y desaceleración permitida. Al añadirlo al *Inspector de parámetros* podemos ver las variables relacionadas a la aceleración límite y el estado de control. En estos parámetros numéricos se pueden forzar excepto el relacionado a la posición.

k. Elemento “Interruptor limitador”

Este elemento se puede considerar como un sensor donde se establecen límites inferiores y superiores (véase la **Figura 23**) y su variable booleana cambia de estado si su variable numérica relacionada llega a sobrepasar estos límites.

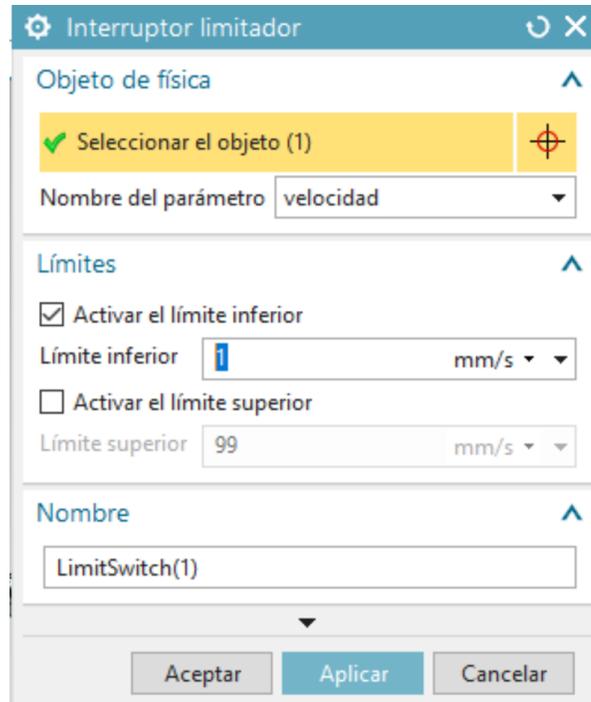


Figura 23. Menú de Interruptor limitador de Siemens NX Fuente: Siemens NX

En el *Inspector de parámetros* notamos las variables relacionadas, una que indica el estado del sensor y la otra si se encuentra en funcionamiento o desactivada.

1. Elemento “Adaptador de señales”

El adaptador de señales (véase la *Figura 24*) es uno de los elementos más importantes relacionados al control y programación de la máquina ya que permite relacionar valores entre parámetros, forzar valores de algunos parámetros o exportar el valor de estas señales como salidas de Siemens NX MCD, las cuales simulan el comportamiento de la máquina y que sirven como entradas para el programa de control que se esté preparando. El proceso para configurar el adaptador de señales se detalla a continuación:

- El primer paso es introducir los parámetros sobre los que se va a trabajar. Para esto, se debe elegir en el menú desplegable el nombre del parámetro.
- Una vez elegido el parámetro se debe dar clic sobre el icono de la derecha “agregar”. Este proceso añadirá otro parámetro en la lista de debajo de manera inmediata.
- En la lista de abajo se debe configurar lo relacionado a este nuevo parámetro especificando si es un parámetro de entrada, salida y el tipo de variable a utilizar.
- Para finalizar, en la sección de “Formulas” relacionarlas buscando el nombre seleccionado en la lista anterior.

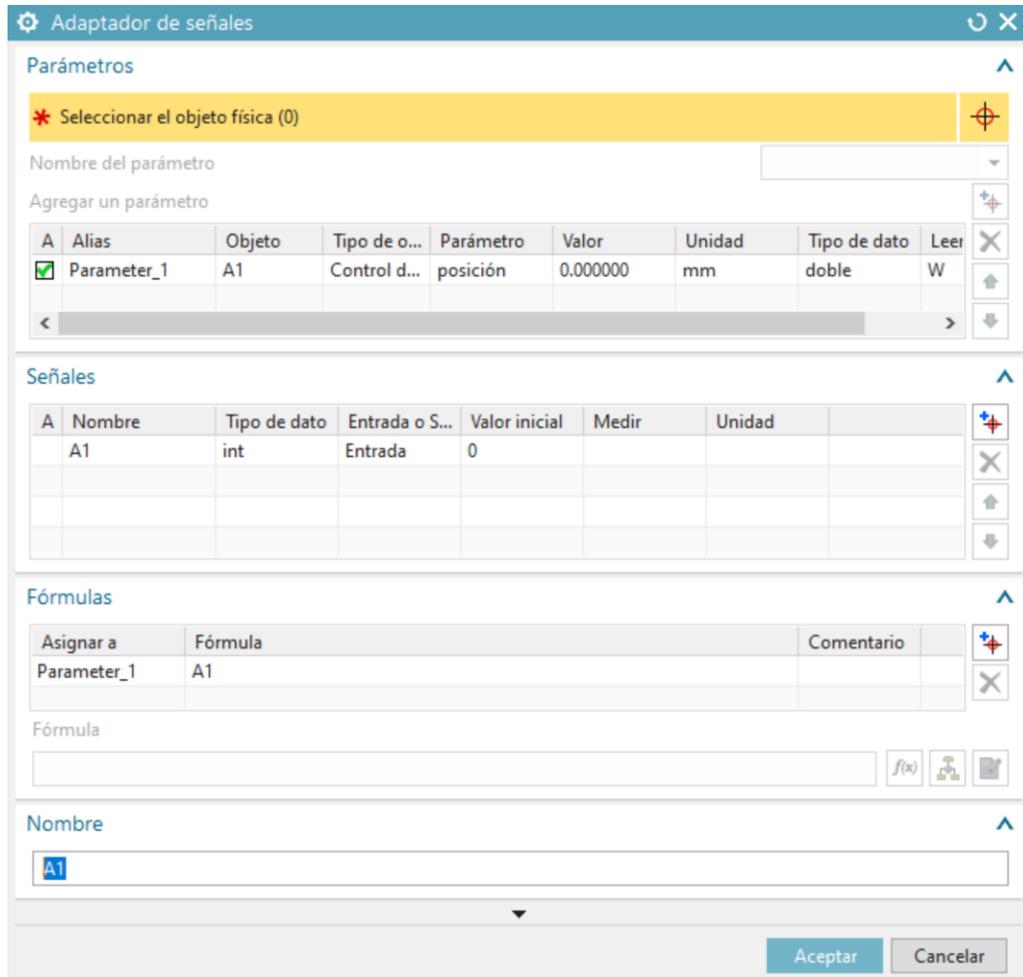


Figura 24. Proceso de Adaptador de señales de un Control de posición de Siemens NX Fuente: Siemens NX

Estas señales son los valores de entrada y salida del modelo digital siendo estas las que se van a comunicar con el programa de control.

m. Elemento “Operación”

Este elemento permite modificar el valor de ciertos parámetros de forma secuencia o condicional, sin hacer uso del control o adaptadores de señal. Una de sus aplicaciones más usadas es para simular la acción de un elemento antes de pasar a su programación externa.

CAPÍTULO 3 IMPLEMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

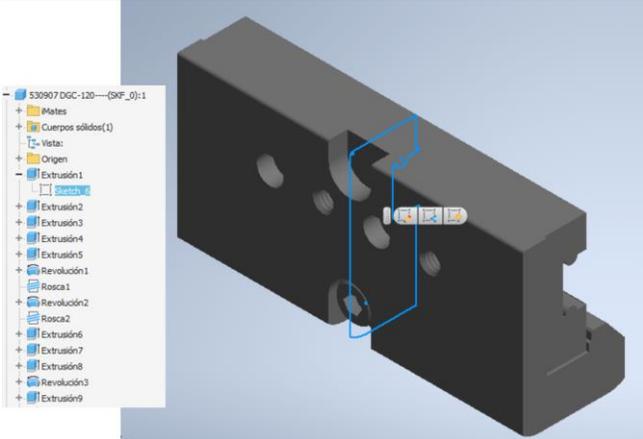
En este capítulo inicia el trabajo realizado, comenzado por el modelado CAD y ensamble de las estaciones de manipulación y proceso del sistema de producción modular de MPS 500 de Festo y finalizando con la comunicación del programa de control con su respectivo gemelo digital.

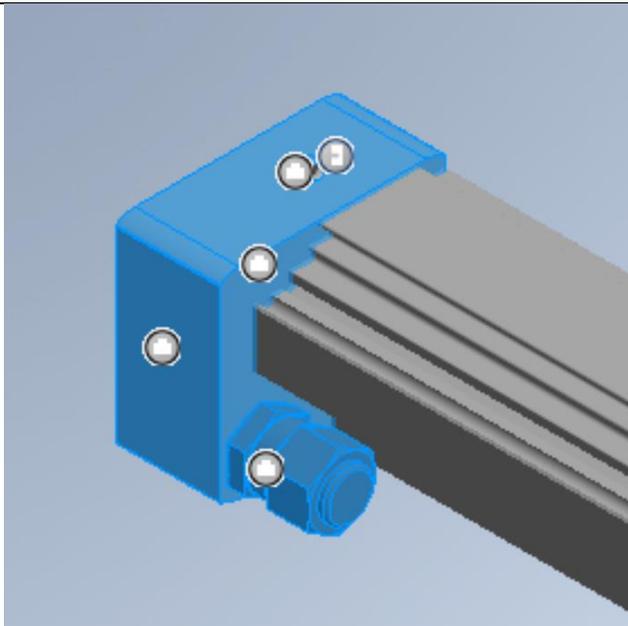
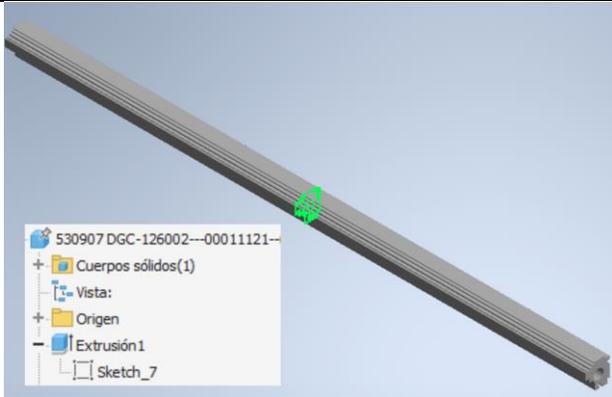
Para el modelado y ensamble es el único punto que dejamos a libre elección al diseñador, debido que la tesis no se enfoca en el diseño 3D, mismo que puede ser realizado en Siemens NX o por preferencias de software o conocimientos en Autodesk Inventor o SolidWorks, esto debido a la compatibilidad de archivos que ofrece Siemens NX, sin olvidar que cada uno de estos programas maneja su propio formato de archivo y con cambiarlos a .step o .stp permiten ser abiertos en Siemens NX.

3.1. Modelado CAD y ensamble de las estaciones

Con lo mencionado en el inicio del capítulo para el modelado y ensamble se utilizó Autodesk Inventor que es un software de modelado paramétrico de sólidos en 3D, por su interfaz sencilla y su poco consumo de recursos. A continuación se va presentación de manera resumida la creación de un ensamble (de un cilindro plano) y las partes de su creación ya que cada estación está conformada por un conjunto de varios ensambles.

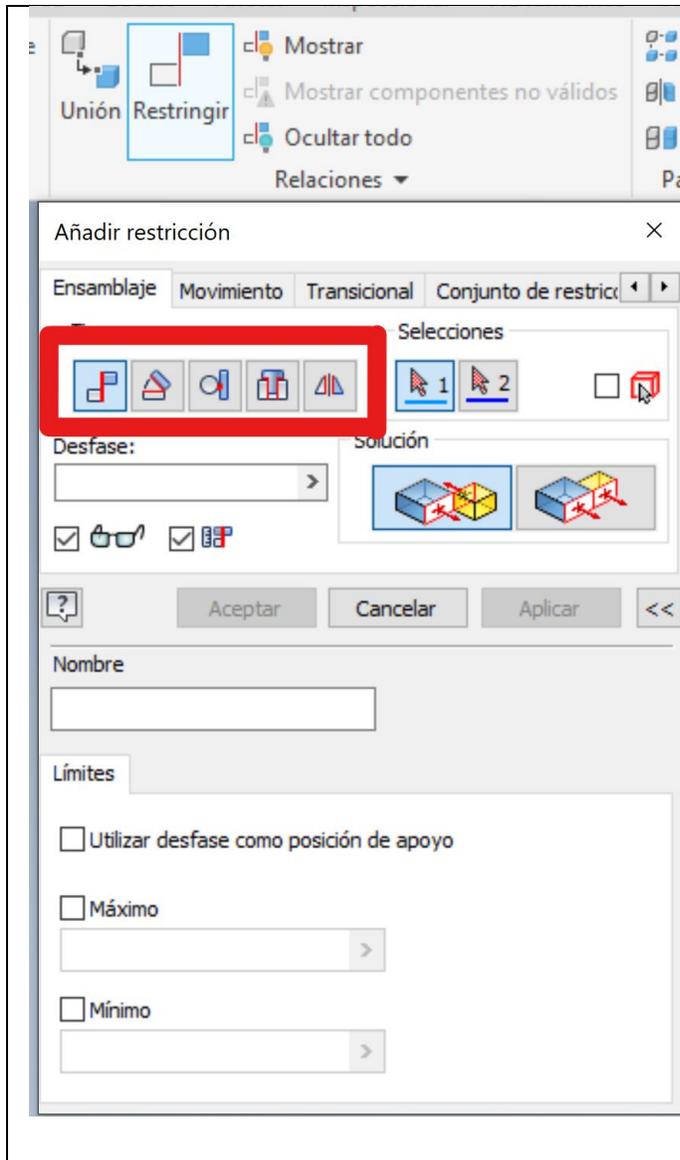
Tabla 1. Modelado y ensamble del cilindro plano de la estación de manipulación

Imagen del procedimiento	Descripción
	<p>En la creación del modelado de un cilindro plano podemos definir este componente en 2, un vástago y el cuerpo del cilindro.</p> <p>Donde cada pieza está conformado por un conjunto de planos y extrusiones que son las encargadas de forma a la pieza.</p>



Una vez creado las piezas principales las mismas se pueden complementar con otras que no son funcionales pero funcionan de manera estética y sirven para asemejar el ensamble a uno de la vida real.

En este caso se va a colocar unos topes que simulen el final del cilindro y que en la vida real sirven para limitar el movimiento del vástago.



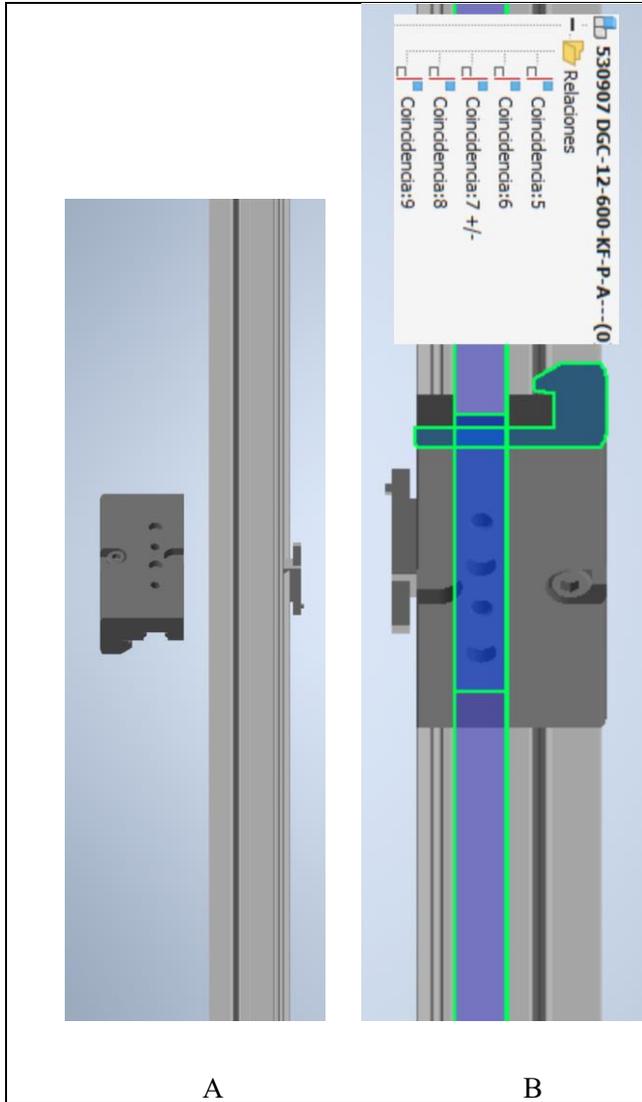
Antes de ensamblar no está más observar las opciones que nos presenta Inventor para dicha función.

En el menú de ensamblar encontramos dos opciones que nos vamos a centrar.

Insertar: es la opción que nos permitirá añadir todas las piezas creadas pero estas se insertan de manera aleatoria en nuestro proyecto.

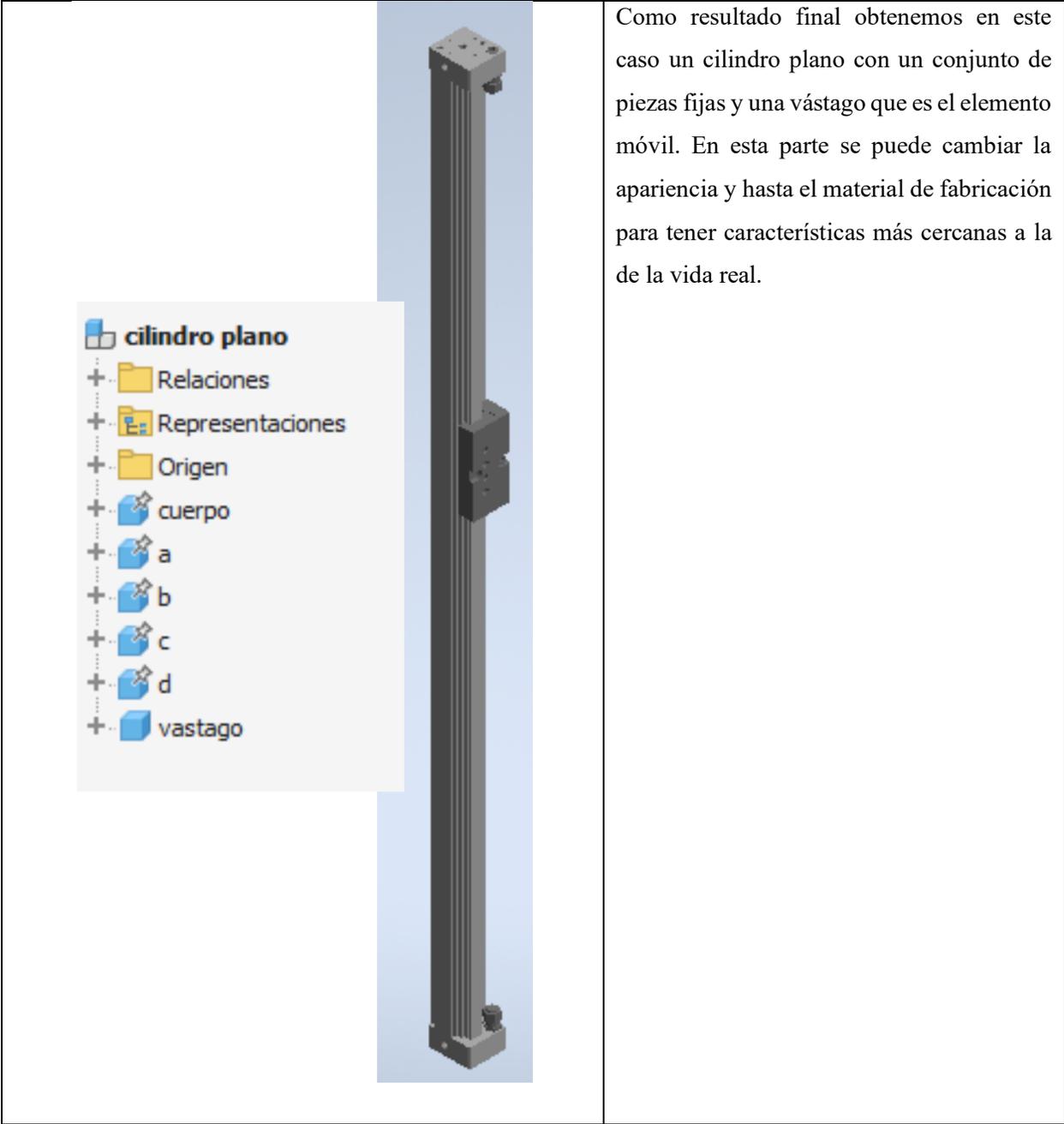
Restringir: esta es la encargada de unir todas las piezas creadas y definir sus movimientos.

En esta observamos los 3 tipos más utilizadas *coincidir*, *tangente e insertar* que por su propia imagen nos podemos dar cuenta en qué tipo de piezas nos conviene utilizar dichas funciones (Observar el recuadro rojo).

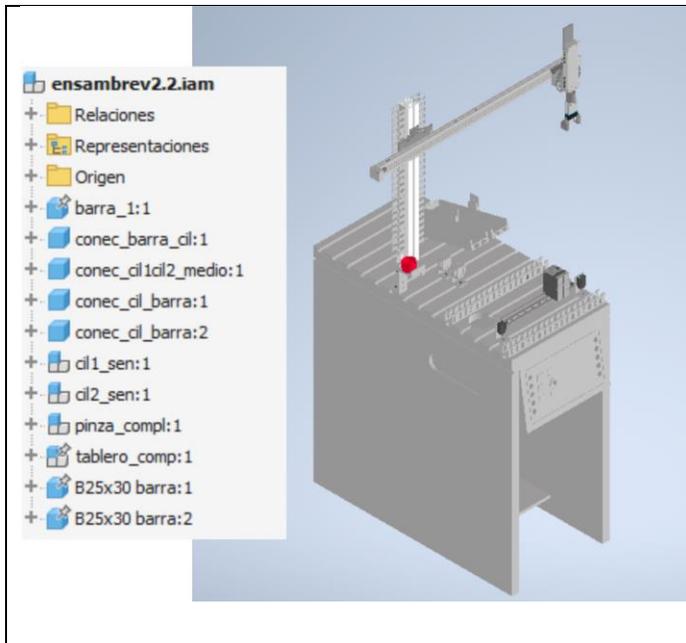


En la **Figura A** observamos cómo se insertan las dos piezas creadas y con un conjunto de restricciones de coincidencia seleccionando caras del vástago y del cuerpo del cilindro definimos su posición y su movimiento en el eje X como se observa en la **Figura B**.

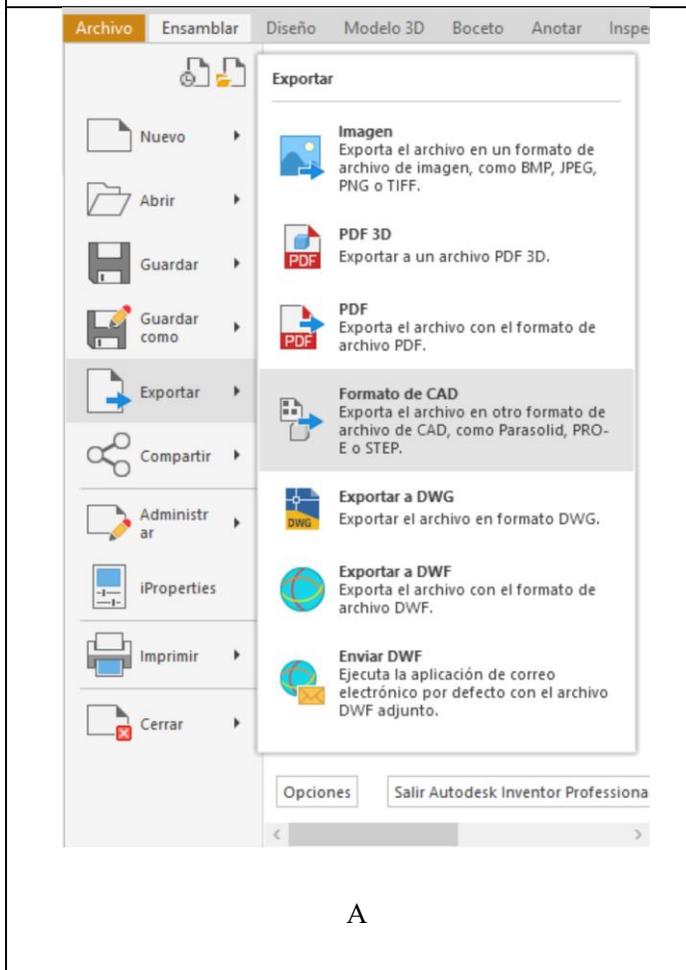
Cabe recalcar que todas las restricciones realizadas en Inventor u otro software de diseño a pasarlo al formato de Siemens NX se mantienen.



Como resultado final obtenemos en este caso un cilindro plano con un conjunto de piezas fijas y una vástago que es el elemento móvil. En esta parte se puede cambiar la apariencia y hasta el material de fabricación para tener características más cercanas a la de la vida real.



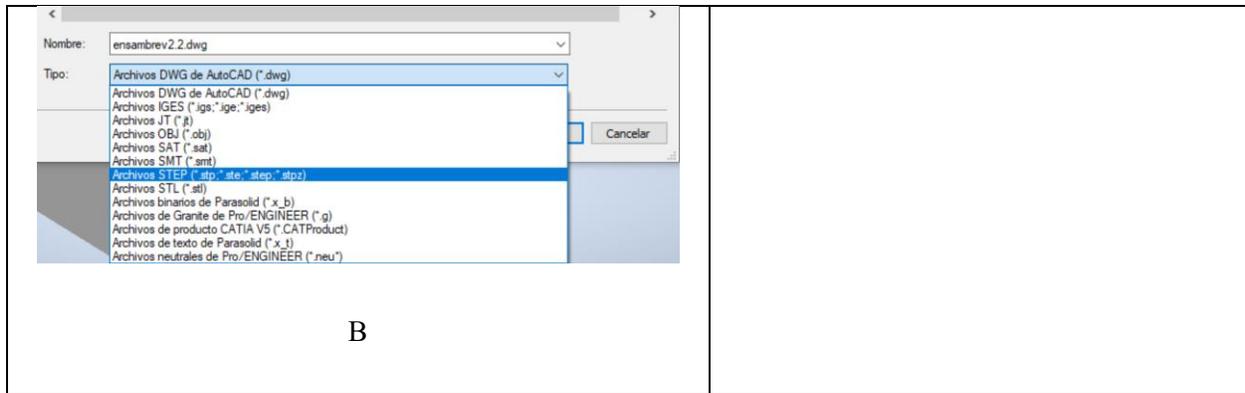
El proceso anterior representado, se recomienda repetir con cada grupo de actuador en este caso los separamos por cilindros y la pinza para luego unirlos facilitando la inserción de todos los componentes y no causar confusión con las restricciones de movimiento, pero como se especificó al inicio esto puede depender del diseñador y su facilidad al crear un modelo.



Una vez finalizado la estación esta se debe pasar a formato .step para ello en el menú de: archivo>exportar>formato de CAD (Revisar la **Figura A**)

Que nos abre un menú que nos permite definir el lugar donde se va a guardar y de igual forma donde debemos cambiar el tipo de archivo al *Archivos STEP* (Revisar la **Figura B**)

A



Este proceso se repite para cada uno de los elementos que conforman las estaciones. Obteniendo dos modelos bases correspondientes a la estación de manipulación y de proceso del sistema de producción modular de MPS 500 de Festo mismo que una vez exportados a Siemens NX se calibraran y configuraran si fuese necesario. A la hora de realizar el gemelo digital es importante entender los modelos y su funcionamiento por ello a continuación se detalla cada uno de ellos de manera individual y detallada.

3.2. Estación de manipulación del sistema de producción modular de MPS 500 de Festo

La idea de la estación de manipulación es tomar piezas con ayuda de una pinza neumática, la cual posee un sensor infrarrojo para la clasificación. La posición inicial y final de la pieza se define por el usuario, por las estaciones adyacentes o por el objetivo que se quiera dar a la pieza a manipular.

3.2.1. Descripción del ciclo de trabajo de la estación de manipulación

Como se indicó anteriormente, la estación de manipulación puede variar su ciclo de funcionamiento dependiendo de la estación adyacente o su función, pero para este capítulo se analizará como una estación independiente, como se puede observar en la *Figura 25*. El ciclo de la estación de manipulación se detalla a continuación:

- La estación inicia sin ninguna pieza y en la posición de reposo. La posición de reposo significa que los cilindros están desactivados y la pinza abierta.
- Para iniciar la secuencia primero se debe activar el switch general (**P0**) que está representado por una llave en el tablero de la estación.
- A continuación, se debe activar el pulsante de *Inicio* (**P1**), el cual iniciará la secuencia. Si por alguna razón la estación no se encuentra su posición de reposo la secuencia no se iniciará. Para solucionar este inconveniente se debe activar el pulsante de *Reset* (**P2**); Tanto P1 como P2 se encuentran en el tablero de la estación.

- Con la secuencia activada, el brazo se queda en espera de una pieza en el soporte. Cuando una pieza está presente se activa con un sensor infrarrojo (S2).
- S2 dará la señal para activar el *actuador lineal* (A1) que es el encargado del movimiento lateral.
- A continuación, se activa el *cilindro plano* (A2) que es el que define el movimiento vertical.
- Seguidamente, se activa la *pinza* (A3) que se encarga de tomar y clasificar la pieza mediante un sensor infrarrojo (S1 y S1_2).
- Una vez con la pieza tomada, esta se clasifica en dos rampas según su color con el dato obtenido del sensor infrarrojo de la pinza (S1_2). Las posiciones de las rampas se definen mediante los sensores de posición colocados en el actuador lineal (A1).
- Una vez que la pieza ha sido colocada en su respectiva rampa, la estación regresa a su posición de reposo a la espera de otra pieza. Este proceso puede operar de manera indefinida.

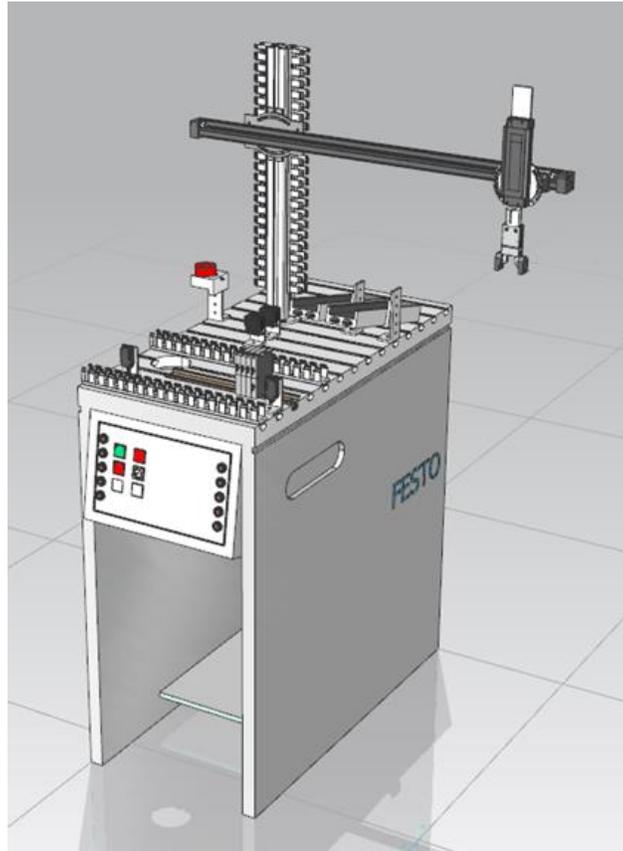


Figura 25. Estación de manipulación

3.2.2. Descripción de los elementos de la estación de manipulación

Una parte fundamental del diseño de los gemelos digitales es entender los elementos y mecanismos que lo conforman, con el fin de jerarquizarlos y simularlos de manera correcta. A esta razón se van a describir las partes principales de la estación.

- **Estructura o base**

La estructura o base es la encargada de soportar todo el resto de los componentes de la estación, en la misma podemos destacar su chasis compacto, e tablero con sus respectivos pulsantes, soporte para electroválvulas, cables y tubos neumáticos. La estructura o base de la estación de manipulación se muestra remarcada en la *Figura 26*.

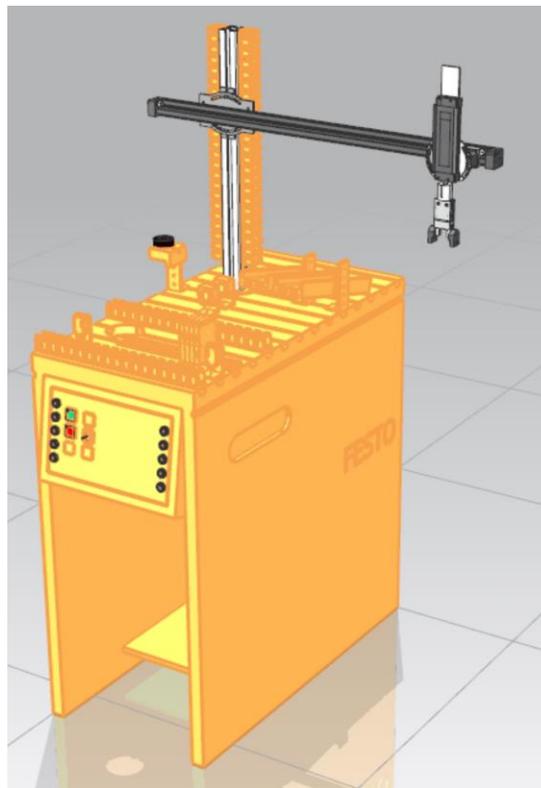


Figura 26. Base de la estación de manipulación Fuente: Autor

- **Actuadores**

La estación de manipulación está conformada por dos cilindros y una pinza. Todos estos componentes son de tipo neumático. El detalle de estos elementos se especifica en la *Tabla 1*.

- **Pieza y acopladores**

La pieza que se va a manipular tiene forma cilíndrica (véase la **Figura 27**). Existen piezas de dos colores: rojo y negro, con el fin de poder realizar un proceso de clasificación.

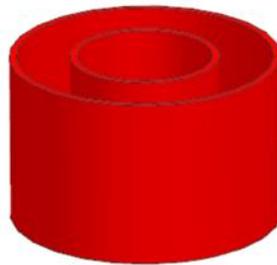
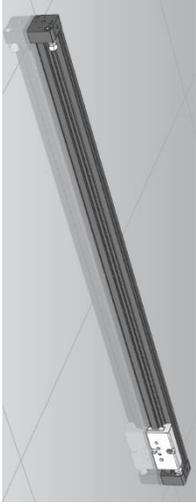
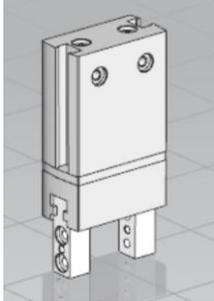


Figura 27. Pieza roja Fuente: Autor

Tabla 2. Actuadores de la estación de manipulación

Elemento	Descripción	Elemento real	Elemento modelado
Actuador lineal o A1	El actuador lineal transforma la energía de movimiento rotatorio de un motor en un movimiento de tracción o empuje accionado por dos electroválvulas 3/2 vías. En el mercado se lo encuentra como cilindro DGC-12-600-KF-P-A		

<p>Cilindro plano o A2</p>	<p>El cilindro plano es accionado por el aire comprimido en ambas direcciones por una electroválvula 5/2 vías. Este cilindro se encuentra en el mercado como cilindro plano DZF-18-80-P-A.</p>		
<p>Pinza o A3</p>	<p>La pinza neumática con agarre en paralelo es accionada por una electroválvula 5/2 vías, cuando se proporciona aire las mordazas se cierran o abren. En el mercado se encuentran como pinza HGP-10-A-B.</p>		

3.2.3. Modelado de la estación de manipulación con Siemens NX MCD

- a. Pieza

Físicas básicas

Lo necesario para definir una pieza como se observa en la **Figura 28** es un *Cuerpo rígido* y un *Cuerpo de colisión*. Como *Cuerpo de colisión* se va a elegir las caras que van a estar en contacto con los “dedos” de la pinza y la parte inferior ya que esta va estar sobre el soporte de piezas.



Figura 28. Físicas básicas de la pieza Fuente: Autor

Este proceso se va a repetir con dos piezas diferentes para poder clasificarlas como se especificó en el ciclo de la estación.

b. Base

La base está conformada por varias piezas, no obstante, casi todas cumplen una función estética antes que funcional, en consecuencia, no es necesario definir las como independientes.

Físicas básicas

Se definió como *Cuerpo rígido* a todos los elementos estructurales y el tablero, evitando a los pulsantes (revisar la **Figura 29**). Además, se añadió un *Cuerpo de colisión* a la superficie de las rampas y al soporte de pieza en forma de malla ya que estas serán las encargadas de soportar a las piezas.

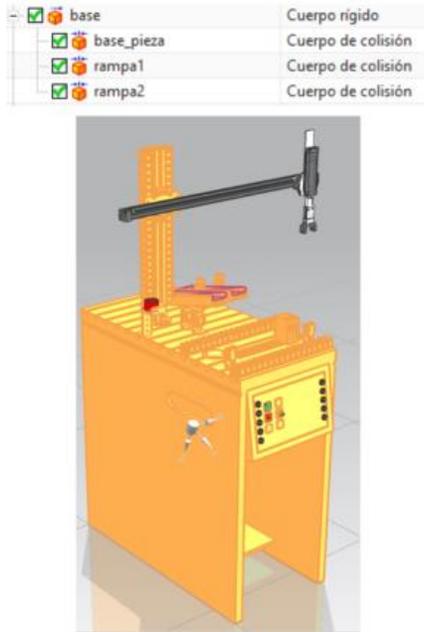


Figura 29. Físicas básicas de la base de la estación de manipulación Fuente: Autor

Junta y restricciones

Con respecto a las juntas y restricciones este es el elemento más sencillo ya que solo está conformado por un *Junta Fija*, (**Figura 30**) debido a que, como su propio nombre lo explica, estos elementos serán la base y no tendrían movimiento durante la simulación.

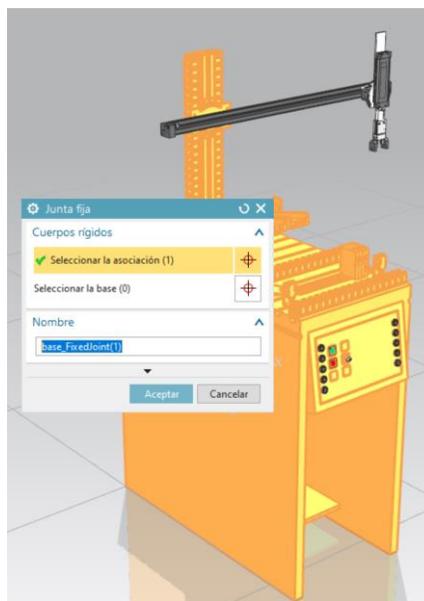


Figura 30. Junta fija de la base de la estación de manipulación Fuente: Autor

Acopladores

Este elemento se conforma por tres piezas (véase la **Figura 31**), las cuales sirven para acoplar la **Base al Actuador lineal**. A continuación, se detallan las partes constitutivas:

- **Parte 1.** Esta parte permite desplazamientos a lo largo del eje Y, cambiando la altura en la que se coloca el actuador lineal
- **Parte 2.** Esta parte permite cambiar el grado de inclinación XY. Es útil si se presentara el caso que el punto final es más alto que el punto inicial o viceversa.
- **Parte 3.** Estas sirven como puntos de sujeción del actuador lineal permitiendo desplazar el punto inicial y final en el eje X.

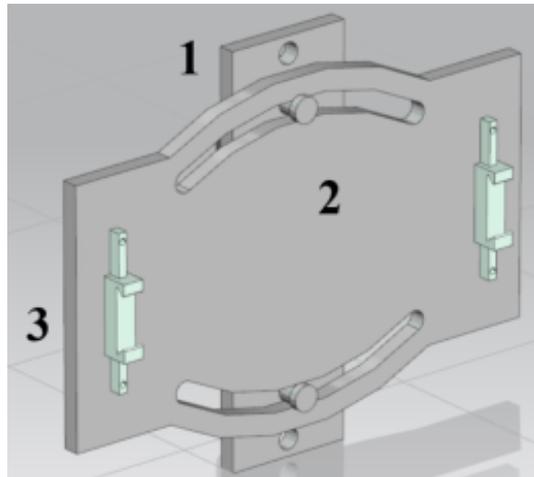


Figura 31. Acopladores de la Base al Actuador lineal Fuente: Autor

c. Actuador lineal (actuador A1)

Antes de entrar a detalle de los actuadores, se debe tener en cuenta que un cilindro está conformado por dos partes, una fija conocida como base y otra móvil conocida como vástago.

Físicas básicas

Con lo mencionado anteriormente, para este elemento se definen dos *Cuerpos rígidos* una base y un vástago (**Figura 32**).

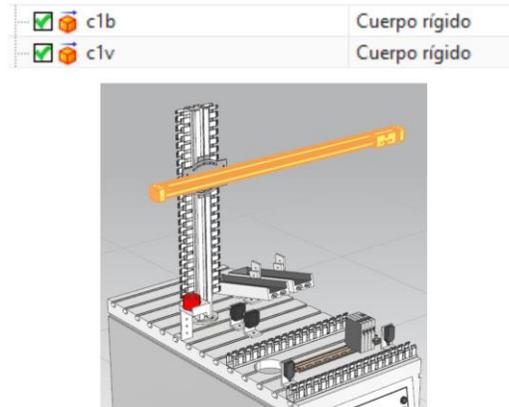


Figura 32. Físicas básicas del Actuador lineal Fuente: Autor

Juntas y restricciones

Al definir la base y el vástago, ahora es posible relacionarlos con dos juntas, como se puede ver en la **Figura 33**. Se utiliza una *Junta deslizante* con los valores establecidos en el diseño. Por otra parte, se añade una *Junta fija* entre la base y la base del actuador lineal añadiéndolo a la estructura general.

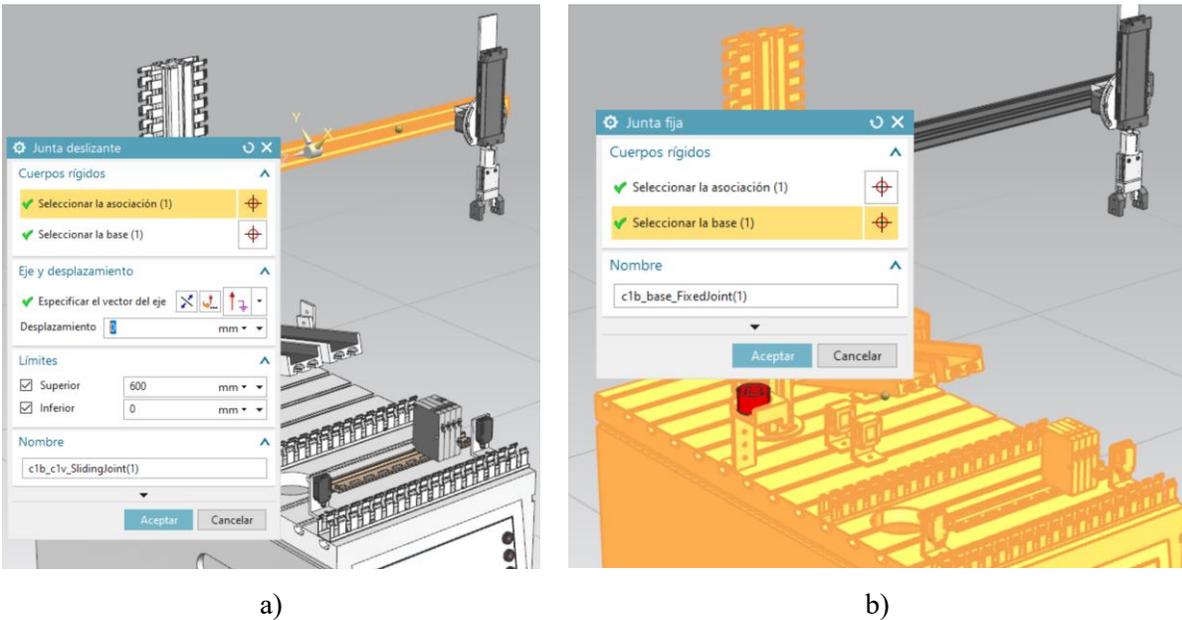


Figura 33. Juntas y restricciones del actuador lineal a) Junta deslizante b) Junta fija de la base con el actuador lineal Fuente: Autor

Acopladores

Dado que el vástago del actuador lineal no es de gran tamaño, se agregará dos partes extras como soporte (véase la **Figura 34**).

- **Parte 1.** Sirve para aumentar el tamaño del vástago del actuador lineal dando un mayor agarre y soporte.
- **Parte 2.** Sirve como soporte para el cilindro plano además de permitir cambiar el grado de inclinación entre XY, por si fuese necesario.

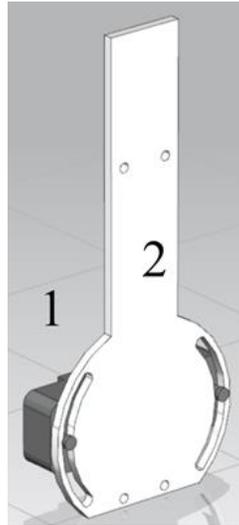


Figura 34. Acoples entre el Actuador lineal y el Cilindro plano. Fuente: Autor

d. Cilindro plano (actuador A2)

Físicas básicas

Se repite el proceso anterior definiendo dos *Cuerpos rígidos*, el vástago y la base del cilindro plano (véase la *Figura 35*).

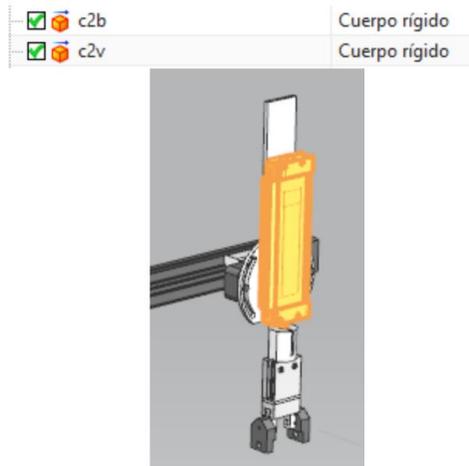


Figura 35. Físicas básicas del Cilindro plano Fuente: Autor

Juntas y restricciones

Como se puede ver en la **Figura 36** se usa dos juntas. Una *Junta fija* entre la base del cilindro plano y el acoplador del actuador lineal, relacionando los actuadores. Por otra parte, para realizar el movimiento se coloca una *Junta deslizante* entre la base y el vástago del cilindro plano.



Figura 36. Juntas y restricciones del Cilindro plano a) Junta deslizante del Cilindro plano b) Junta fija entre el Actuador lineal y el Cilindro plano Fuente: Autor

Acopladores

Este elemento tiene la misión de acoplar el vástago del cilindro con la pinza neumática. La forma física del acoplador se ilustra en la **Figura 37**.

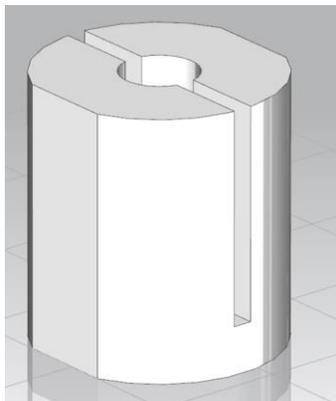


Figura 37. Acople entre el Cilindro plano y la Pinza Fuente: Autor

e. Pinza (actuador A3)

Físicas básicas

Para la pinza se utiliza el mismo concepto del cilindro, pero con la diferencia que aquí se definirán tres *Cuerpos rígidos* correspondientes a la base y los dos “dedos” de la pinza. Estos cuerpos deben ser definidos como *Cuerpos de colisión* ya que son los encargados del agarre de la pieza (véase la **Figura 38**).

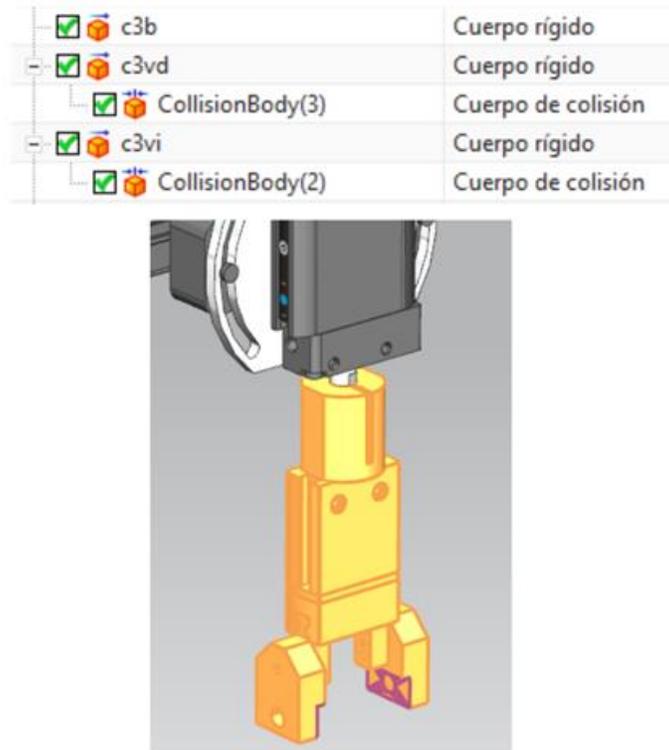


Figura 38. Físicas básicas de la Pinza Fuente: Autor

Juntas y restricciones

Con una *Junta fija* entre la base de la pinza y el acoplador del cilindro plano logramos añadirlo a la estación y la formamos completamente. Con respecto a los “dedos” de la pinza se coloca dos *Juntas deslizantes* invertidas para simular el movimiento de tomar o soltar las piezas (véase la **Figura 39**).

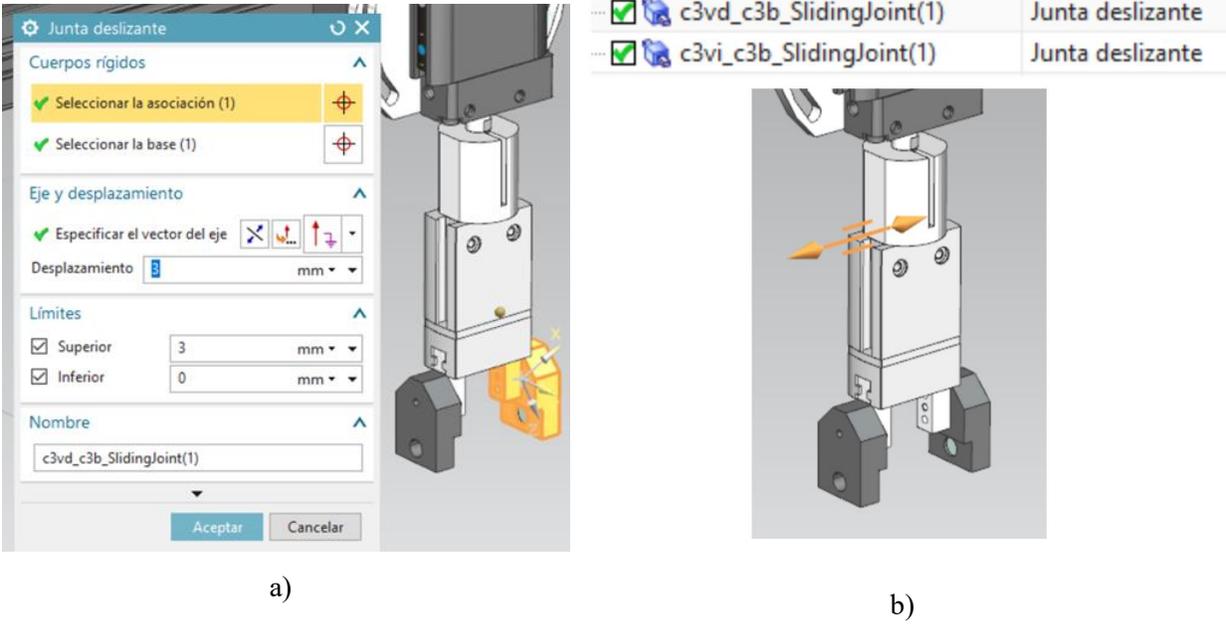


Figura 39. Juntas y restricciones de la Pinza a) Junta deslizante derecha de la pinza b) Juntas deslizantes invertidas de la Pinza
Fuente: Autor

Acopladores

Una pinza puede manipular diferentes tipos de piezas. En este caso se van a manipular piezas cilíndricas, por consiguiente, se ha realizado un diseño como el que se muestra en la **Figura 40**. En complemento, se ha diseñado la pinza para que pueda albergar un sensor infrarrojo, por ello se coloca un terminal que aumente el tamaño de los “dedos”, para aumentar la sección de contacto y agarre.

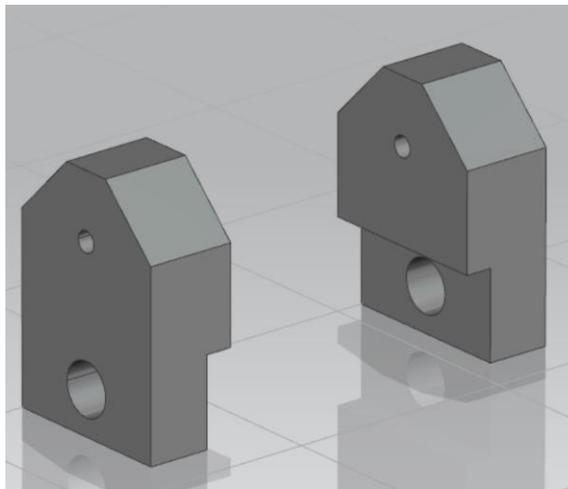


Figura 40. Terminales para la Pinza Fuente: Autor

f. Sensores y actuadores

Los sensores y actuadores como: *Control de posición*, *Interruptor limitador*, *sensor de Colisión* se detallan en el **Capítulo 4** En esta sección se van a enumerar todos los utilizados (**Figura 41**) y su posición dentro del gemelo digital de la estación de manipulación (**Tabla 2**).

Sensores y actuadores	
<input checked="" type="checkbox"/> 1B1	Interruptor limitador
<input checked="" type="checkbox"/> 1B2	Interruptor limitador
<input checked="" type="checkbox"/> 1B3	Interruptor limitador
<input checked="" type="checkbox"/> 1B4	Interruptor limitador
<input checked="" type="checkbox"/> 2B1	Interruptor limitador
<input checked="" type="checkbox"/> 2B2	Interruptor limitador
<input checked="" type="checkbox"/> A1	Control de posición
<input checked="" type="checkbox"/> A2	Control de posición
<input checked="" type="checkbox"/> A3d	Control de posición
<input checked="" type="checkbox"/> A3i	Control de posición
<input checked="" type="checkbox"/> P0	Interruptor limitador
<input checked="" type="checkbox"/> P1	Interruptor limitador
<input checked="" type="checkbox"/> P2	Interruptor limitador
<input checked="" type="checkbox"/> S1	Sensor de colisión
<input checked="" type="checkbox"/> S1_2	Sensor de colisión
<input checked="" type="checkbox"/> S2	Sensor de colisión

Figura 41. Sensores y actuadores de la estación de manipulación Fuente: Autor

Tabla 3. Especificación de los sensores y actuadores de la estación de manipulación Fuente: Autor

Ubicación	Actuadores	Sensores	Tipo
Actuador lineal	A1	1B1	Sensor de proximidad
		1B2	
		1B3	
		1B4	
Cilindro plano	A2	2B1	Sensor de proximidad
		2B2	
Pinza	A3d	S1	Sensor infrarrojo
	A3i	S1_2	
Soporte de pieza		S2	

Un detalle que se debe resaltar es que el *Control de posición* de la pinza debe ser solo uno, a pesar de que este elemento sea controlado con dos actuadores **A3d** y **A3i**. Esto debido a que el movimiento se define con

dos *Juntas deslizantes* invertidas donde el encargado de interpretarlo como un solo movimiento será TIA Portal. Esto se detalla más a profundidad en la **Sección 6.2**.

g. Conexión de señales

Para finalizar la estación de manipulación en Siemens NX se va a realizar la conexión de las señales con la instancia de TIA Portal cargada en PLCSIM Advanced. A continuación, en la **Tabla 3** se especifica el sentido de comunicación de las variables y el tipo de cada una de ellas. El proceso de mapeo de las señales se explica en profundidad en la **Sección 7**.

Tabla 4. Mapeo de las variables de la estación de manipulación Fuente: Autor

Siemens NX			Tia Portal						
Elementos			Direccion	Tipo de datos	Nombre	Funciones	Direccion	Tipo de datos	Nombre
Actuador 1 Actuador linea	A1	←	#MW0	Int	A1	M1	#Q4.0	Bool	M_1
						M2	#Q4.1	Bool	M_2
Sensor de posicion	1B1	→					#I10.1	Bool	B1_1
	1B2	→					#I10.2	Bool	B2_1
	1B3	→					#I10.3	Bool	B3_1
	1B4	→					#I10.4	Bool	B4_1
Actuador 2 Cilindro plano	A2	←	#MW2	Int	A2	M3	#Q4.2	Bool	M_3
Sensor de posicion	2B1	→					#I10.5	Bool	B1_2
	2B2	→					#I10.6	Bool	B2_2
Actuador 3 Pinza	A3d	←	#MW4	Int	A3d	M4	#Q4.3	Bool	M_4
	A3i	←	#MW6	Int	A3i				
Sensor infrarrojo	S1	→					#I11.0	Bool	S1
	S1_2	→					#I11.1	Bool	S1_2
Sensor infrarrojo	S2	→					#I11.2	Bool	S2
Activadores	P0	→					#I11.3	Bool	P0
	P1	→					#I11.4	Bool	P1
	P2	→					#I11.5	Bool	P2

3.3. Estación de proceso del sistema de producción modular de MPS 500 de Festo

Como su propio nombre lo especifica, la idea de esta estación es realizar un proceso definido como las etapas de producción de un objeto. En el caso de esta estación las etapas son: verificar la posición de una pieza sobre la mesa de trabajo y posicionar de manera correcta la pieza sobre la mesa de trabajo para luego realizar una perforación usando un taladro (Revisar la **Figura 42**).

3.3.1. Descripción de ciclo de trabajo de la estación de proceso

El ciclo de la estación de proceso se detalla a continuación:

- La estación se encuentra en estado de reposo, sin ninguna pieza. El estado de reposo significa que los cilindros están desactivados, la mesa giratoria en posición inicial y el taladro en el extremo superior en su posición inicial.
- En primera instancia se debe activar la estación con el switch general (**P0**) que está representado por una llave en el tablero de la estación.
- A continuación, se debe activar el pulsante de *Inicio* (**P1**) que iniciará la secuencia; si por alguna razón la estación no se encuentra su posición de reposo la secuencia no se iniciará. Para resolver este inconveniente se debe activar el pulsante de *Reset* (**P2**). Ambos pulsantes se encuentran en el tablero.
- Con la secuencia iniciada por el pulsante (**P1**), el sistema queda a la espera de que una pieza llegue a la mesa comandada por el *actuador giratorio* (**A1**), la pieza será censada en la mesa por el sensor capacitivo (**S1**).
- Al detectar la primera pieza en el sensor capacitivo (**S1**), el actuador giratorio (**A1**) se activa hasta llegar a la siguiente posición, la cual se censa mediante la detección de contacto entre la mesa y el sensor inductivo (**S4**).
- Una vez que la pieza llega a la siguiente posición, y siendo detectada la pieza por el sensor capacitivo (**S3**), se activará el actuador neumático (**A4**) perteneciente al módulo de verificación. En este paso la pieza es evaluada y se comprueba la perforación. Si existe una perforación el módulo de verificación enviara al CPU un dato booleano true, caso contrario false.
- Finalizada la verificación, la mesa rotará hasta la siguiente posición, una vez la pieza sea detectada por el sensor capacitivo **S3**, activará el actuador lineal horizontal **A2** perteneciente al módulo de sujeción, con el objetivo de sujetar la pieza en el lugar adecuado. Luego se activará el módulo de perforación con su actuador lineal vertical **A3** para cumplir con la perforación de la pieza, los límites de movimiento del actuador **A3** están guiados por los sensores de fin de carrera, **3B1** y **3B2**.
- Finalmente, terminada la perforación, el actuador vuelve a su posición inicial y de igual manera el actuador **A1** gira hasta la posición de origen nuevamente, dejando lista la pieza para ser manipulada por subestaciones adyacentes del MPS.

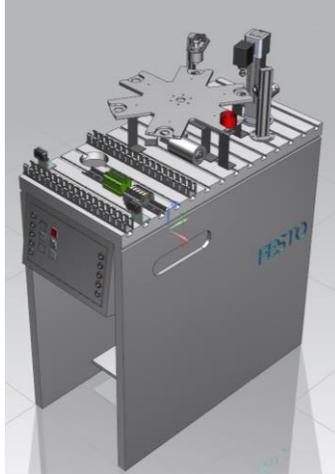


Figura 42. Estación de proceso Fuente: Autor

3.3.2. Descripción de los elementos de la estación de proceso

Al igual que en la subestación previamente expuesta en este documento, a continuación, se detalla el funcionamiento de cada subsistema de la estación de proceso, con la finalidad de entender claramente su principio de operación y poder desarrollar el modelado mecánico del gemelo digital.

- **Estructura o base y pieza**

La estructura y la pieza tienen la misma forma de la estación anterior. Por consiguiente, para esta parte no hace falta dar detalles de diseño. Si se quiere consultar los detalles de estos elementos se puede revisar la Sección 4.1, *Figura 27* y *Figura 43*.

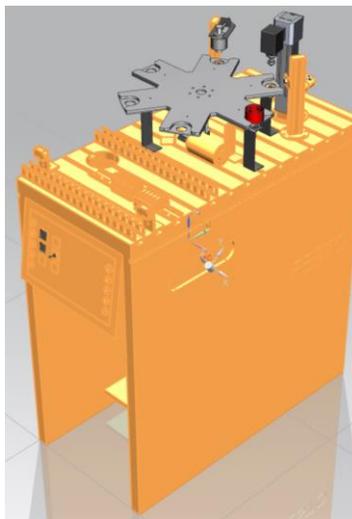
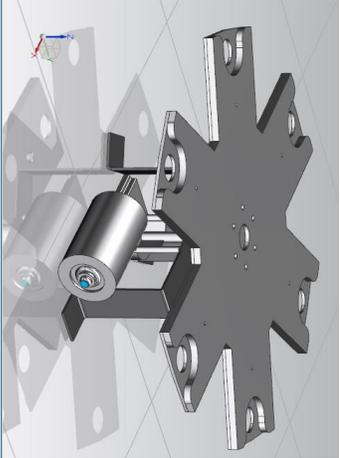


Figura 43. Base de la estación de proceso Fuente: Autor

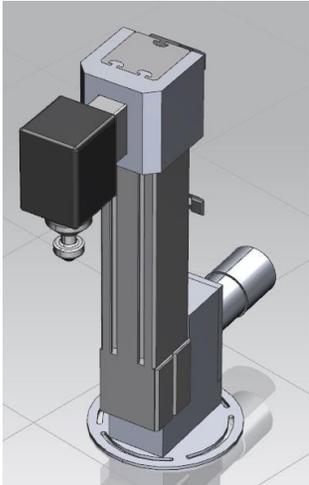
- **Actuadores**

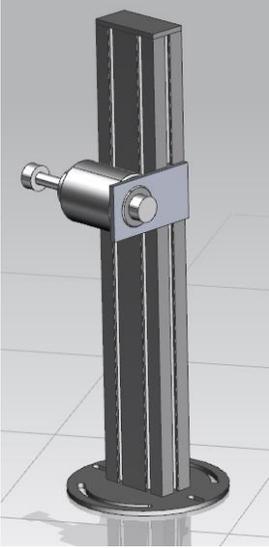
Repitiendo el proceso de la estación de manipulación, para la estación de proceso se detallan todos sus actuadores en la **Tabla 4** con una descripción de su funcionamiento y comparando el elemento modelado con su elemento real que se encuentra en el mercado.

Tabla 5. Actuadores de la estación de proceso Fuente: Autor

Elemento	Descripción	Elemento real	Elemento modelado
<p>Mesa de Indexación o A1</p>	<p>Componente que cuenta con seis posiciones y es la encargada de trasladar la pieza alrededor del proceso de manufactura y prueba. Esta accionada por un motor reductor DC y las posiciones están determinadas por los tornillos anclados en la parte inferior de la mesa, los cuales al hacer contacto con un sensor inductivo emiten una señal booleana que determinará la posición.</p> <p>Mecánicamente la mesa giratoria en cada una de sus seis posiciones está diseñada con un espacio para albergar la pieza a ser mecanizada y esta tiene en si una hendidura, la cual deja al descubierto la parte de la</p>		

	<p>pieza para que esta sea detectada por los sensores capacitivos ubicados en el inferior de la mesa giratoria</p>		
<p>Módulo de verificación o A4</p>	<p>Este módulo se encarga de verificar la pieza colocada en la hendidura de la mesa giratoria. En caso de que el agujero de la pieza se encuentre en la parte superior, el vástago del cilindro neumático llega hasta su posición final y hará contacto con el sensor inductivo colocado en la parte superior del cilindro, indicando de tal modo, que la pieza se encuentra bien posicionada.</p>		

<p>Módulo de perforación o A3</p>	<p>Este módulo se encarga de la manufactura de la pieza en la subestación de proceso, esta comandada por un actuador lineal compuesto por un motor DC a 24VDC, el cual se encarga del movimiento vertical del módulo, sus límites de movimiento están dados por sensores que funcionan como fines de carrera, esto para marcar el límite de accionamiento del actuador lineal. Al activarse los sensores de fin de carrera estos se encargan de invertir el giro del motor reductor para llevarlo a la posición inicial.</p>	 <p>A photograph of the drilling module A3. It is a vertical industrial machine with a blue motor at the top, a silver metal frame, and a drill bit at the bottom. The machine is mounted on a circular base.</p>	 <p>A 3D CAD model of the drilling module A3. It shows the machine's structure in a light gray color, including the motor, the vertical frame, and the drill bit. The model is shown from a perspective view, highlighting its vertical orientation and compact design.</p>
--	--	---	---

<p>Módulo de sujeción o A2</p>	<p>Este componente funciona a la par del módulo de perforación, se encarga de sujetar y ubicar la pieza en la posición correcta para una adecuada perforación. Está compuesto por un solenoide eléctrico, el cual funciona con 24VDC de alimentación.</p>		
---------------------------------------	---	---	---

3.3.3. Modelado de la estación de proceso con Siemens NX MCD

a. Base

Como se especificó en la sección anterior y al ser similar a la estación de manipulación, este componente no tiene funciones de movimiento, únicamente cumple funciones de soporte y brinda estética al módulo.

Físicas básicas

Como se puede ver en la **Figura 44**, se define como *Cuerpo Rígido* a todos los elementos que conforman la estructura de la base, evitando los pulsantes.

Juntas y restricciones

En este elemento se define únicamente una *Junta Fija (Figura 45)*, ya que, haciendo referencia a su propio nombre, no debe estar en movimiento durante la simulación del modelo, pues simplemente sirve como referencia de sujeción para los demás componentes.

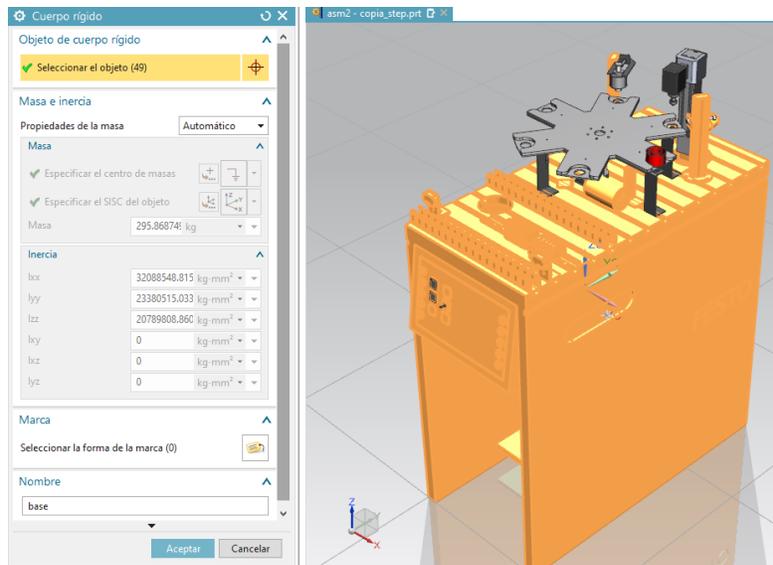


Figura 44. Físicas básicas de la base de la estación de proceso Fuente: Autor



Figura 45. Juntas y restricciones de la base de la estación de proceso Fuente: Autor

Acopladores

En el elemento que previamente ha sido designado como una junta fija, están adheridos más componentes, los cuales sirven de soporte para otros subsistemas. A estos componentes se denominan acopladores, los cuales se describirán a continuación.

En la **Figura 46** se muestra el acople entre la **Base** y el **Módulo de verificación**. Este elemento se divide en dos partes.

- **Parte 1.** Esta parte permite sujetar el sensor inductivo y a la vez brinda soporte del módulo de verificación, mediante los rieles que se pueden ver ubicados en su costado.
- **Parte 2.** Esta parte permite anclar el módulo de verificación a la base del ensamble, mediante grapas y tornillos adaptados a los rieles de la base.

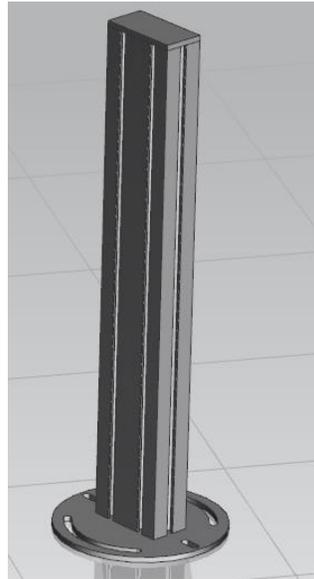


Figura 46. Acoplador del módulo de verificación con la base Fuente: Autor

En la **Figura 47** se puede observar un acople que permite anclar el módulo de mesa giratoria de indexación a la base de la estación de proceso.

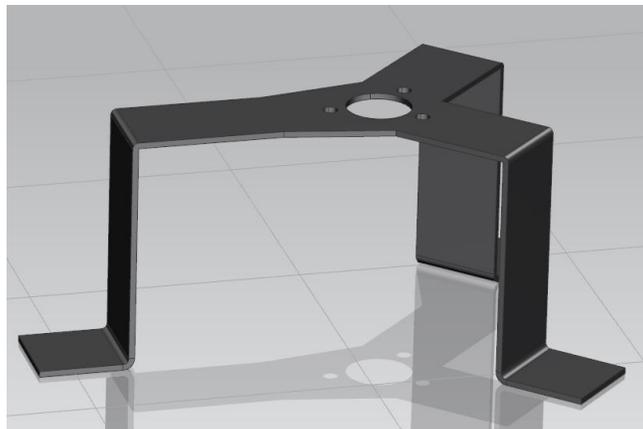


Figura 47. Acoplador de la mesa de indexación giratoria con la base Fuente: Autor

En la **Figura 48** se puede observar el acoplador entre la **Base** y el **Modulo de perforación** que se divide en dos partes:

- **Parte 1:** Esta parte permite fijar el módulo de perforación, es decir el motor y el riel, con el fin de proporcionar movimiento al actuador lineal
- **Parte 2:** Permite anclar el módulo de perforación a la base del ensamble, mediante grapas y tornillos adaptados a los rieles de la base.

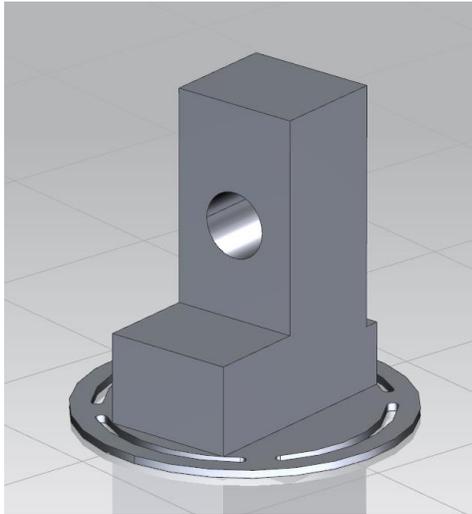


Figura 48. Acoplador del módulo de perforación con la base Fuente: Autor

En la **Figura 49** se muestra el elemento acoplador entre el **Módulo de sujeción** y la **Base**. Este elemento está dividido en tres partes:

- **Parte 1:** Acople que sirve para anclar el actuador lineal **A2** a la base del módulo de sujeción. Está ubicado a la altura necesaria y mediante el mismo se podrá ajustar el posicionamiento del actuador antes mencionado.
- **Parte 2:** Permite anclar el módulo de perforación a la base del ensamble, mediante grapas y tornillos adaptados a los rieles de la base.
- **Parte 3:** Esta parte permite sujetar el actuador lineal del módulo de sujeción, mediante los rieles que se pueden ver ubicadas en su costado.

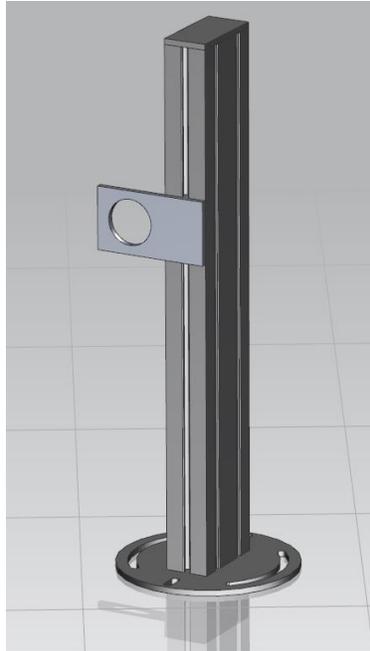


Figura 49. Acoplador del módulo de sujeción con la base Fuente: Autor

b. Mesa de indexación giratoria o A1

Físicas básicas

Como físicas básicas se definen dos elementos del ensamble como *Cuerpos rígidos* (véase la **Figura 50**), los cuales serán parte fundamental para el funcionamiento en simulación de la mesa giratoria.

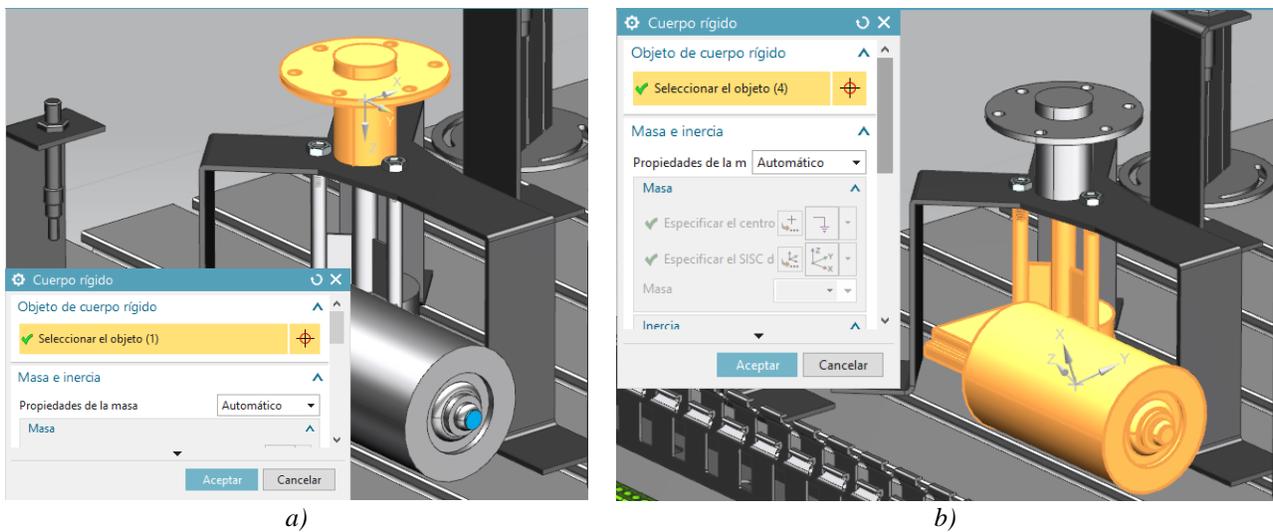


Figura 50. Físicas básicas de la mesa de indexación giratoria a) El elemento móvil b) El elemento fijo Fuente: Autor

Juntas y restricciones

Una vez definidos los elementos como rígidos, a continuación, se debe proporcionar una junta de restricción de acuerdo con el movimiento que el elemento va a tener en la simulación. En este caso se selecciona la *Junta de charnela* para el elemento que se encarga del giro del motor y la *Junta fija* que será asignada a la base de la mesa giratoria (Revisar la **Figura 51**), que se encarga de conectar la parte giratoria con la base.

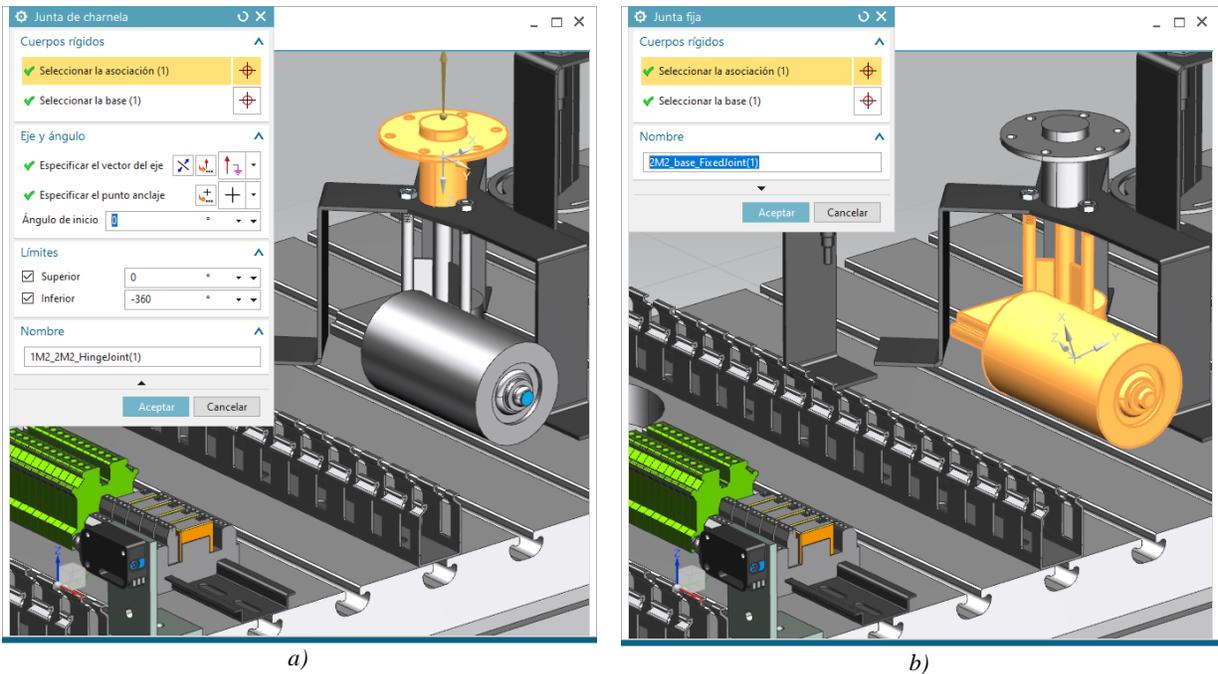


Figura 51. Juntas y restricciones de la Mesa de indexación giratoria a) Junta charnela en el elemento móvil b) Junta fija en el elemento fijo Fuente: Autor

Acopladores

Los acopladores para la mesa giratoria (véase la **Figura 52**) se detallan a continuación.

- **Parte 1.** Base plana de diseño de la mesa giratoria, la cual, en la parte media cuenta con agujeros de fijación para ser anclada y fijada a la parte giratoria de la mesa, dejando espacio para la lectura de los sensores.
- **Parte 2.** Elemento plano que en cada posición programada de la mesa se encuentra una hendidura que se moldea de acuerdo con la pieza.

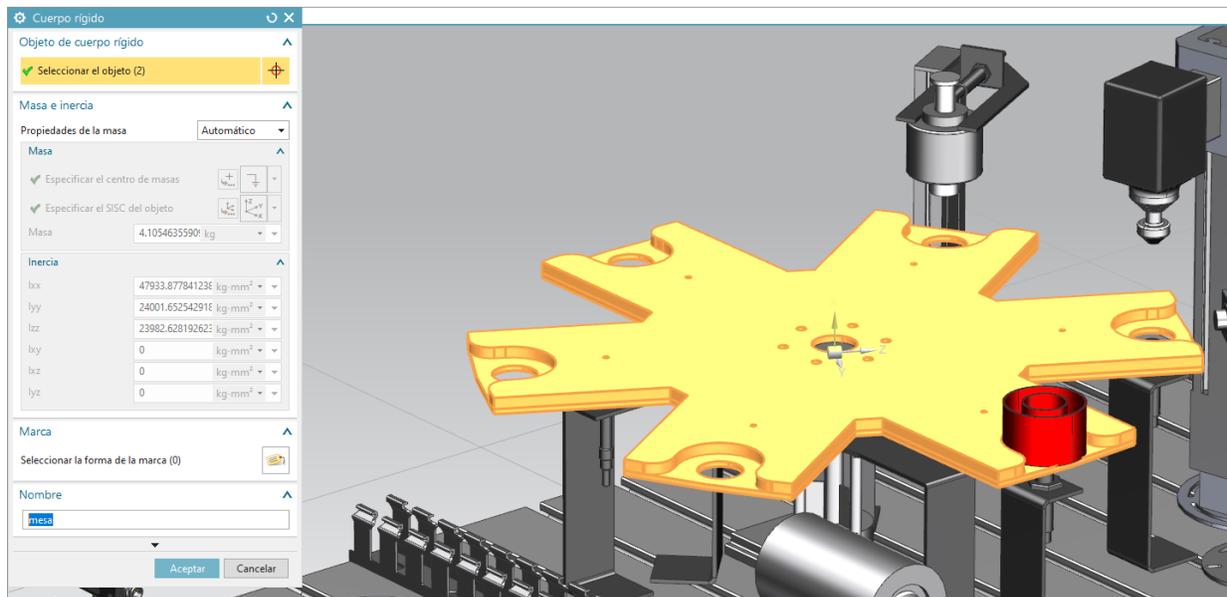


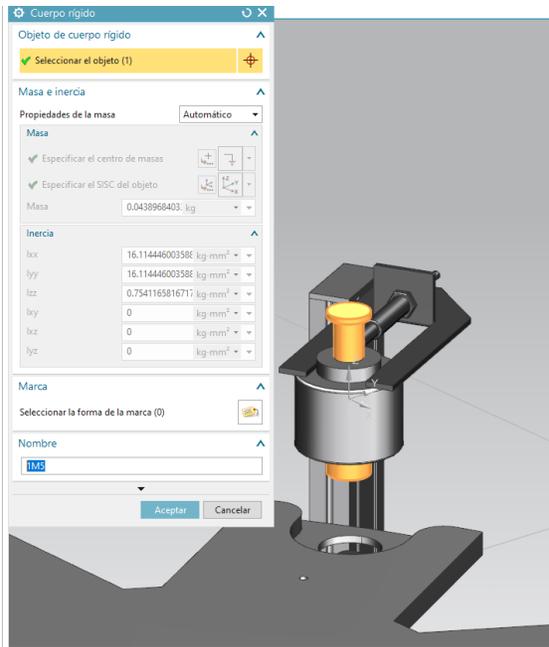
Figura 52. Acoplador plano de mesa giratoria de indexación Fuente: Autor

c. Módulo de verificación o A4

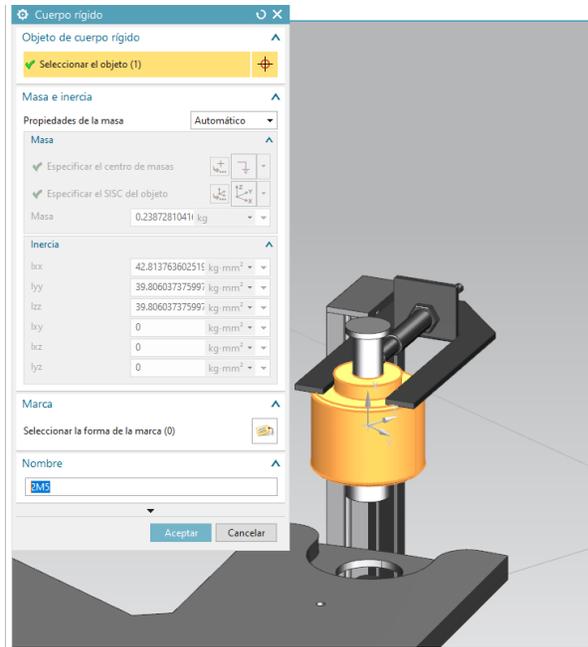
Como ya se aclaró previamente, para la estación adyacente a la estación de proceso, se debe tener en cuenta el funcionamiento de un cilindro neumático. Con base a este funcionamiento, se procede a analizar los fundamentos físicos involucrados en el diseño de este elemento.

Físicas básicas

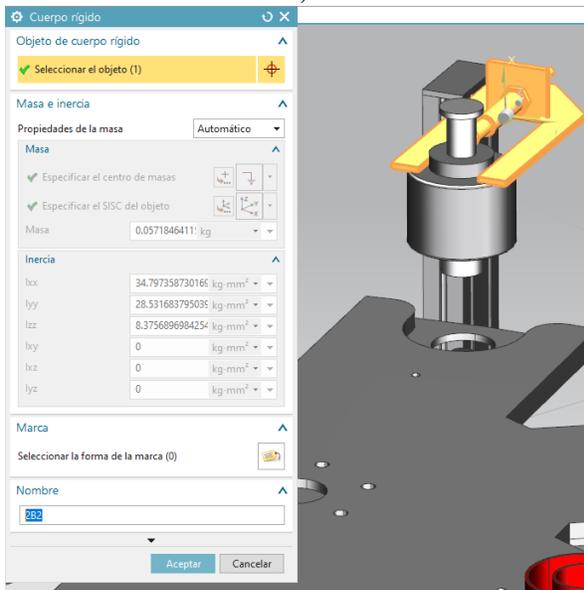
Se definen como *Cuerpos rígidos* los elementos del cilindro (base y vástago). Además, el extremo final del vástago se define como *Cuerpo de colisión*, pues es el que tendrá interacción con el externo final del sensor inductivo **4B1**, el cual está apoyado en el soporte al igual que la base del cilindro. Para un mayor detalle véase la *Figura 53*.



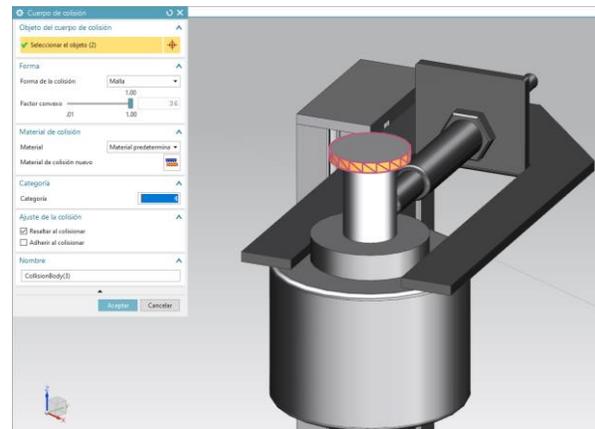
a)



b)



c)



d)

Figura 53. Físicas básicas para el módulo de verificación a) Vástago del cilindro electro neumático como cuerpo rígido b) Cuerpo del cilindro electro neumático c) Soporte y sensor definidos como cuerpos rígidos d) Extremo final del vástago como cuerpo de colisión Fuente: Autor

Juntas y restricciones

Una vez que se encuentra definidos como cuerpos rígidos, se proporciona al elemento la junta, de acuerdo con la función del sistema. Para este caso se ocupa una *Junta fija* debido al anclaje del cilindro con la base del ensamble. Por otra parte, se asigna una *Junta deslizante* (véase la **Figura 54**), debido a al movimiento vertical que deberá hacer el elemento.

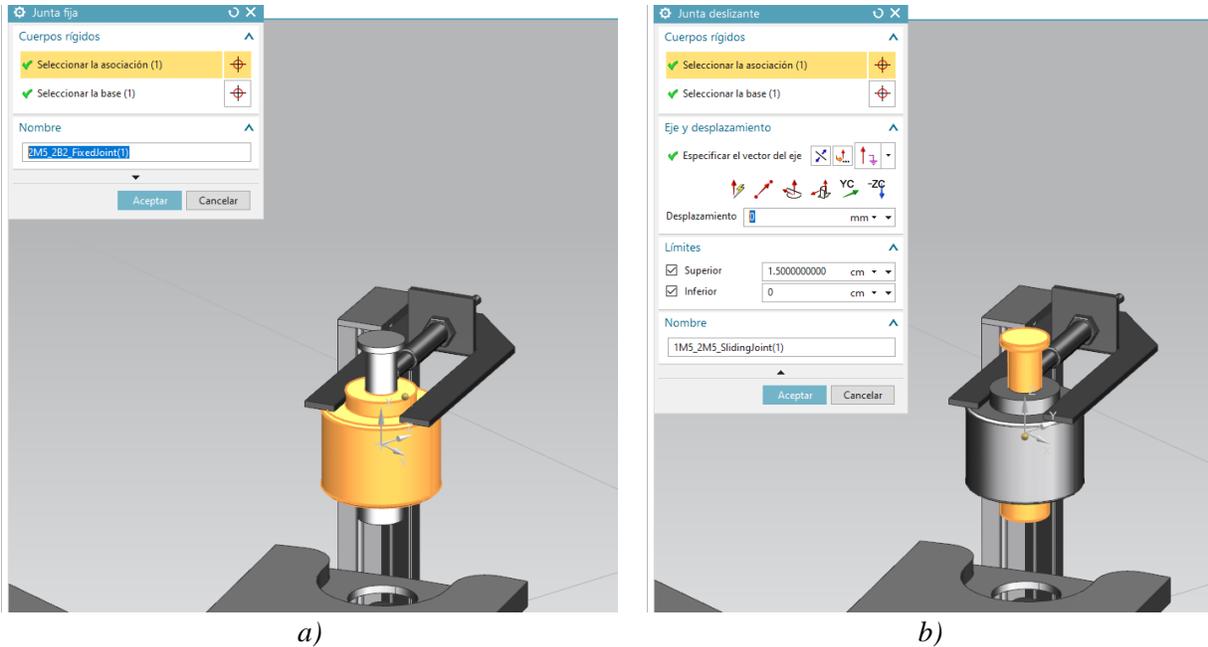
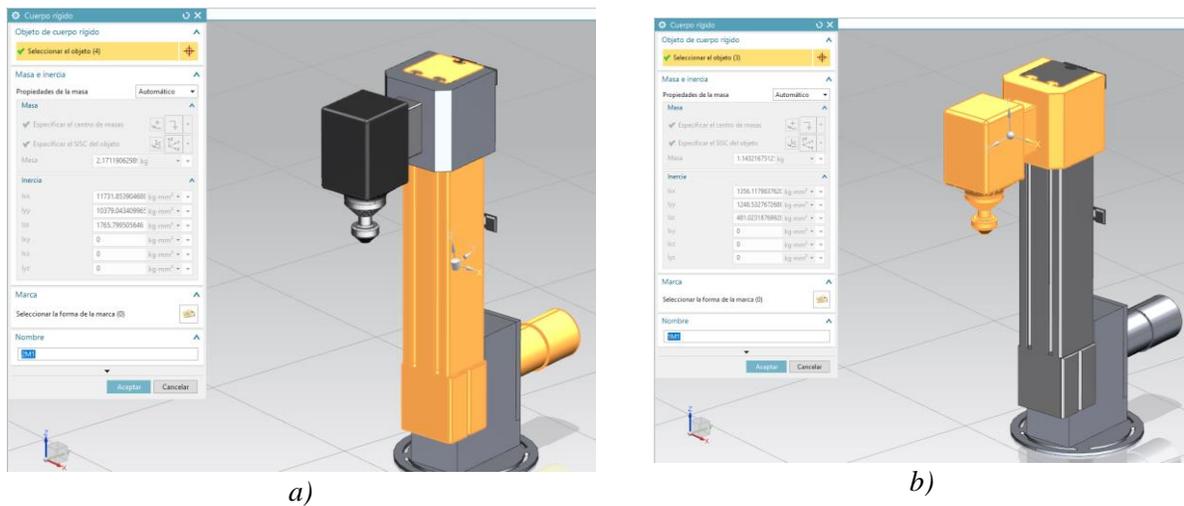


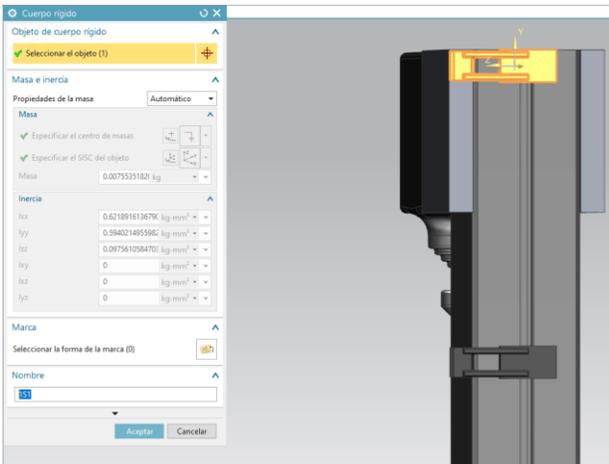
Figura 54. Juntas y restricciones del módulo de verificación a) Junta fija entre el módulo y la base b) Junta deslizando al vástago del cilindro electro neumático Fuente: Autor

d. Módulo de perforación o A3

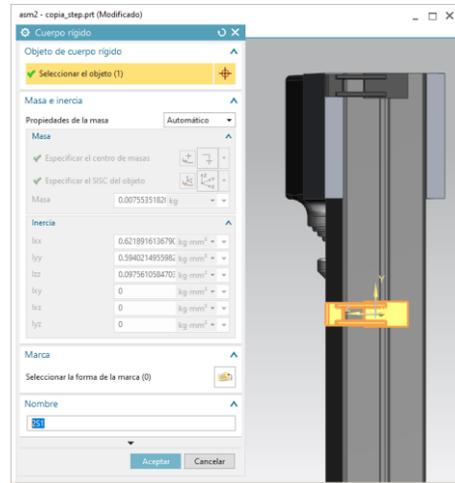
Físicas básicas

El movimiento de este elemento se basa en cuatro elementos, por lo tanto, se definirán los cuatro como *Cuerpos rígidos*, tal como se lo ve en la **Figura 55**. Además, se debe proporcionar propiedades físicas de un *Cuerpo de colisión* para la parte del elemento que va a interactuar con los sensores de fines de carrera que delimitaran el movimiento del actuador lineal del taladro.

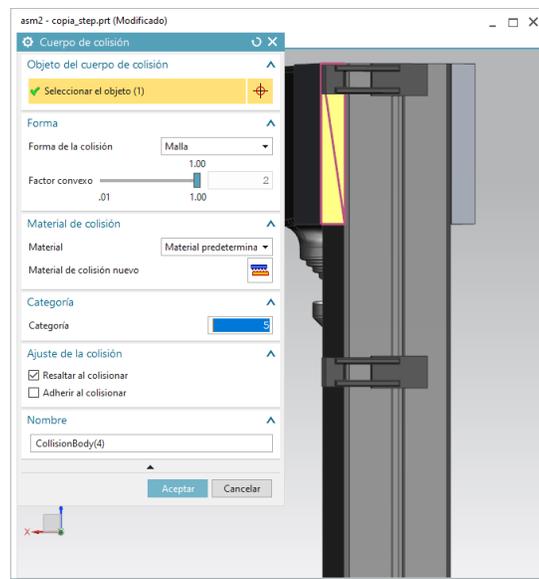




c)



d)



e)

Figura 55. Físicas básicas del módulo de perforación a) Base de recorrido del taladro b) Taladro c) Sensor 3B2 e) Definición como cuerpo de colisión la cara anterior al taladro Fuente: Autor

Juntas y restricciones

Primeramente, se definen los elementos que serán asignados como *Juntas Fijas*, las cuales serán las encargadas de servir de anclaje para la parte móvil. Posteriormente, para la parte móvil se define un solo componente como *Junta deslizante* vertical (*Figura 56*).

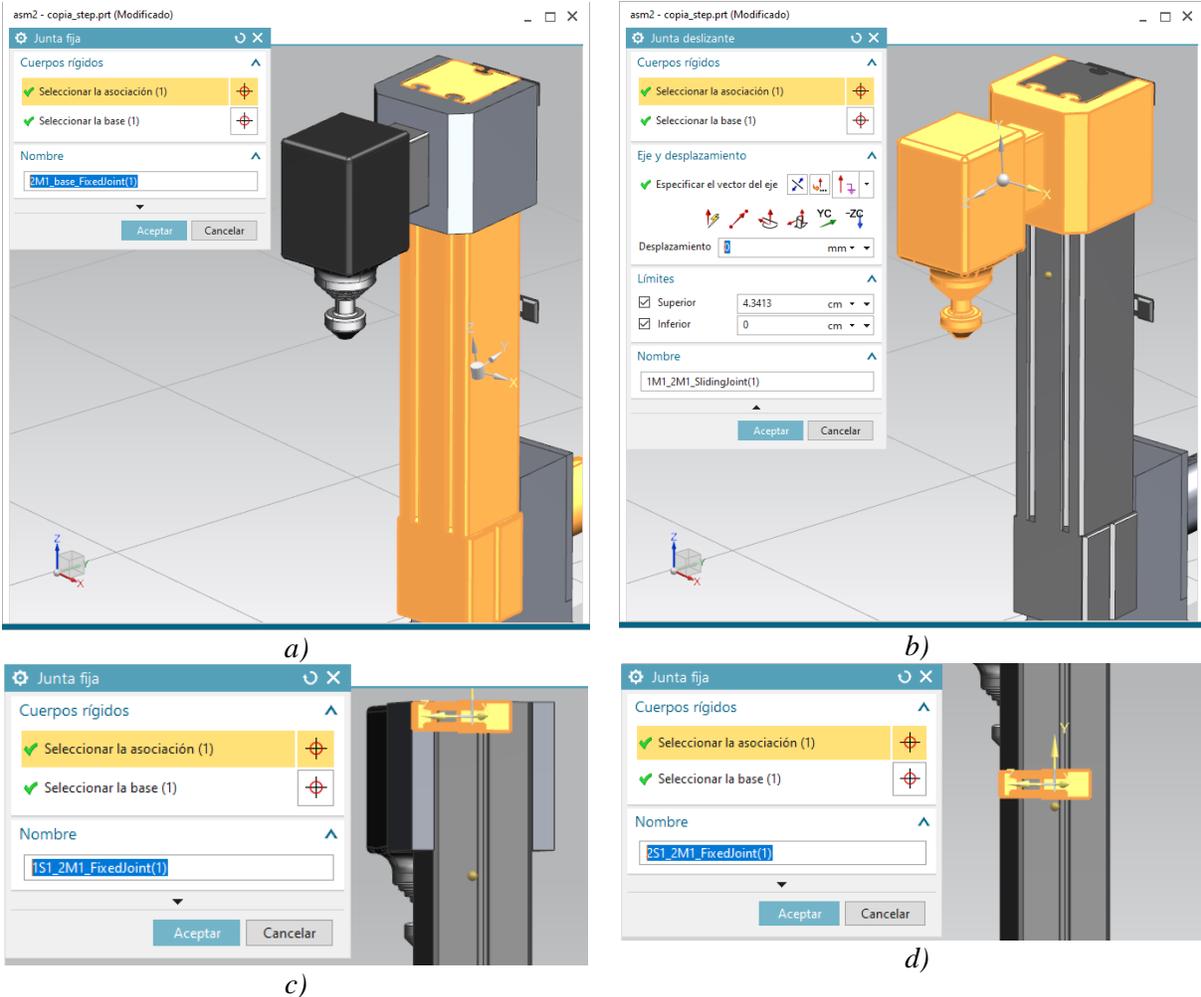


Figura 56. Junta y restricciones del módulo de perforación a) Junta fija al carril del taladro b) Junta deslizante asignada al cuerpo del taladro c) y d) Son juntas fijas a los sensores fin de carrera Fuente: Autor

e. Módulo de sujeción

Físicas básicas

Los *Cuerpos rígidos* definidos para este elemento son dos, tal cual fue aplicado previamente en este documento sobre el cilindro neumático. Así también el extremo final del vástago del cilindro será definido como un *Cuerpo de colisión*, ya que tendrá interacción con la pieza al momento de acomodarla en la mesa de indexación como se puede observar en la *Figura 57*.

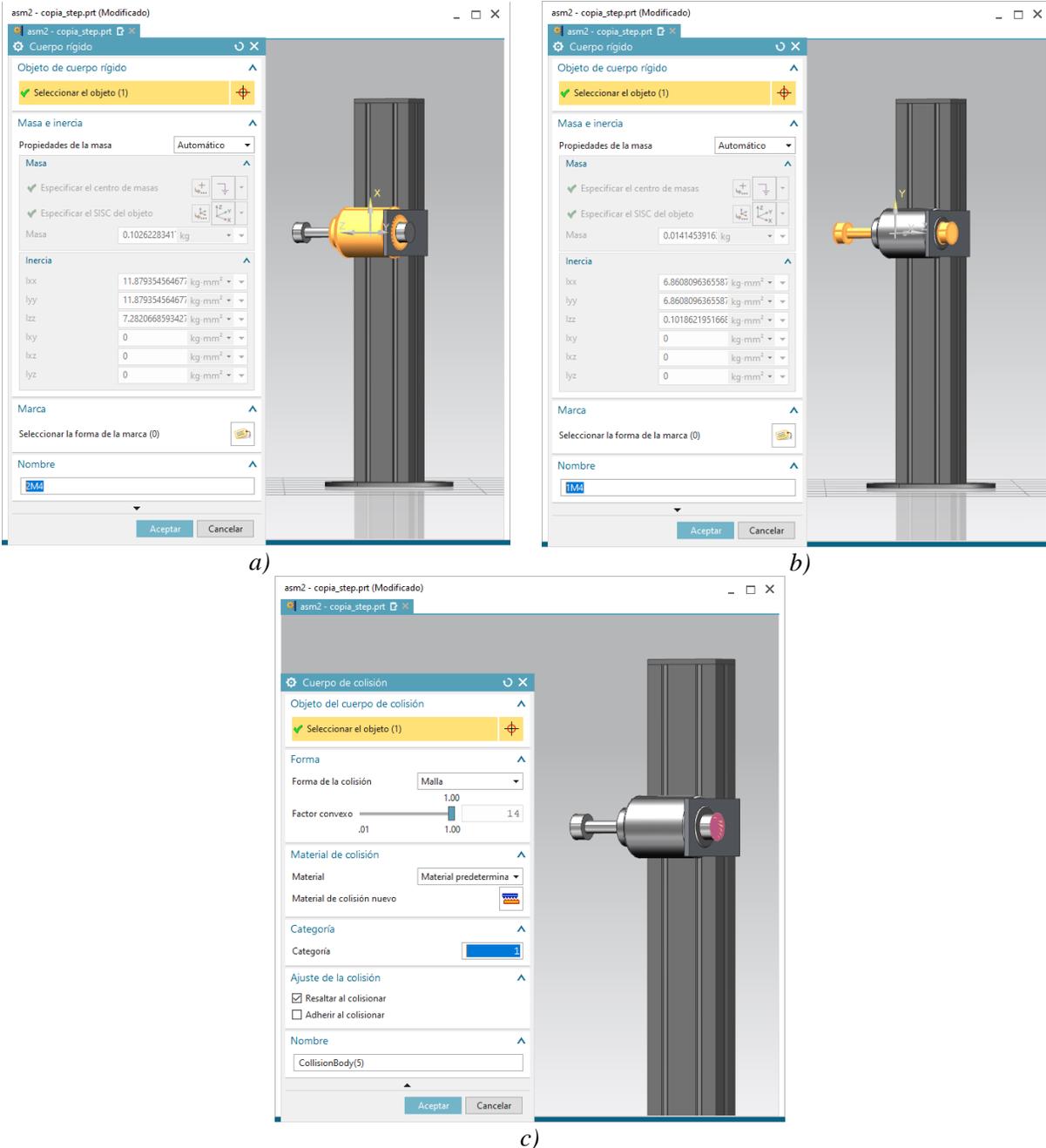


Figura 57. Físicas básicas del módulo de sujeción a) y b) como cuerpos rígidos al cuerpo y vástago del cilindro electro neumático respectivamente c) Cuerpo de colisión a la cara extrema del vástago Fuente: Autor

Juntas y restricciones

Para este elemento se planteó dos tipos de juntas para los dos componentes, una *Junta deslizante* y una *Junta fija* (véase la **Figura 58**), aplicando el mismo concepto visto ya previamente sobre la asignación de juntas a un cilindro neumático.

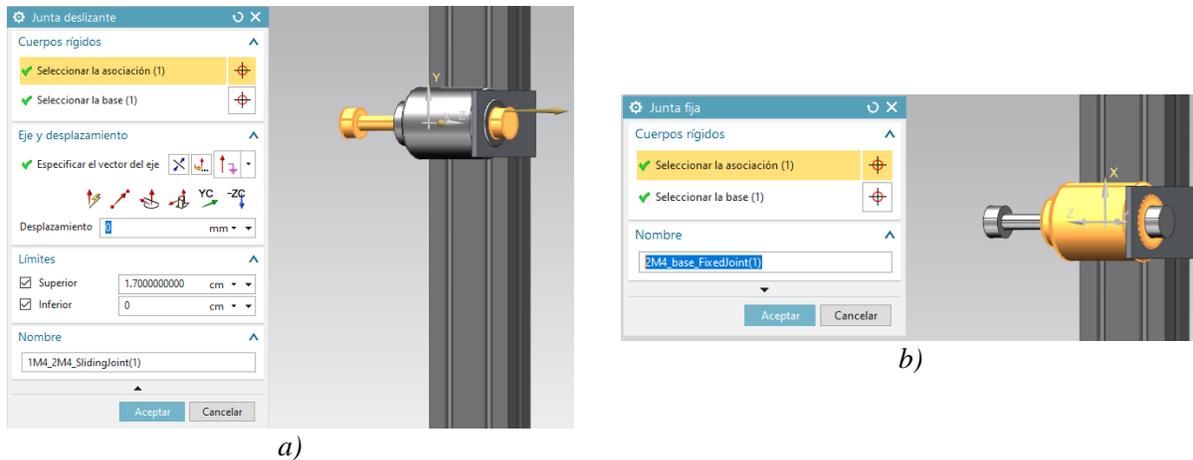


Figura 58. Juntas y restricciones del módulo de sujeción a) Junta deslizante al vástago b) Junta fija al cuerpo del cilindro
Fuente: Autor

f. Sensores y actuadores

Similar a la estación de manipulación, en la **Figura 59** y en la **Tabla 5**, respectivamente, se detallan los sensores y actuadores utilizados para esta estación.

Sensores y actuadores	
<input checked="" type="checkbox"/> 3B1	Interruptor limitador
<input checked="" type="checkbox"/> 3B2	Interruptor limitador
<input checked="" type="checkbox"/> 4B1	Sensor de colisión
<input checked="" type="checkbox"/> A1	Control de posición
<input checked="" type="checkbox"/> A2	Control de posición
<input checked="" type="checkbox"/> A3	Control de posición
<input checked="" type="checkbox"/> A4	Control de posición
<input checked="" type="checkbox"/> P0	Interruptor limitador
<input checked="" type="checkbox"/> P1	Interruptor limitador
<input checked="" type="checkbox"/> P2	Interruptor limitador
<input checked="" type="checkbox"/> S1	Sensor de colisión
<input checked="" type="checkbox"/> S2	Sensor de colisión
<input checked="" type="checkbox"/> S3	Sensor de colisión
<input checked="" type="checkbox"/> S4	Sensor de colisión

Figura 59. Sensores y actuadores de la estación de proceso Fuente: Autor

Tabla 6. Especificación de los sensores y actuadores de la estación de proceso Fuente: Autor

Ubicación	Actuadores	Sensores	Tipo
Mesa de Indexación giratoria	A1	S1	Sensor de proximidad
		S2	
		S3	
		S4	
Módulo de sujeción	A2		
Módulo de perforación	A3	3B1	Sensor infrarrojo
		3B2	
Módulo de verificación	A4	4B1	

g. Conexión de señales

Para finalizar con la estación de manipulación, en Siemens NX se realiza la conexión de las señales con la instancia de TIA Portal cargada en PLCSIM Advanced. En la **Tabla 6** se especifica el sentido de comunicación de las variables como el tipo de cada uno de ellas. Repitiendo lo mencionado en la sección de la estación de manipulación este proceso se detalla con más a profundidad en la **Sección 7**.

Tabla 7. Mapeo de las variables de la estación de proceso Fuente: Autor

Siemens NX			Tia Portal						
Elementos			Direccion	Tipo de datos	Nombre	Funciones	Direccion	Tipo de datos	Nombre
Actuador 1 Mesa de Indexación	A1	←	#MW2	Int	A1	AC1	#Q4.0	Bool	M1
Actuador 2 Modulo de sujeción	A2	←	#MW4	Int	A2	AC2	#Q4.1	Bool	M2
Actuador 3 Modulo de perforación	A3	←	#MW6	Int	A3	AC3	#Q4.2	Bool	M3 arriba
							#Q4.3	Bool	M3 abajo
Sensores de posición	3B1	→					#I11.0	Bool	B1_3
	3B2	→					#I11.1	Bool	B2_3
Actuador 4 Modulo de verificación	A4	←	#MW8	Int	A4	AC4	#Q4.4	Bool	M4
Sensor de posición	4B1	→					#I10.7	Bool	B1_4
Sensor capacitivo	S1	→					#I10.3	Bool	S1
	S2	→					#I10.5	Bool	S2
	S3	→					#I10.4	Bool	S3
Sensor inductivo	S4	→					#I10.6	Bool	S4
Activadores	P0	→					#I10.0	Bool	P0
	P1	→					#I10.1	Bool	P1
	P2	→					#I10.2	Bool	P2

3.4. Comunicación de los modelos en Siemens NX con el PLC Virtual y descripción del programa del PLC

3.4.1. Descripción del proyecto de TIA Portal para la estación de manipulación

Las estaciones serán controladas con un PLC SIMATIC S7-1500 de SIEMENS. La CPU utilizada para este caso será la **CPU 1511C-1 PN**. El proyecto detallado para el autómata se puede encontrar en el **Anexo 1**. En esta sección se explicará brevemente todos los bloques del programa, así como su función.

Bloques de datos

El programa incluye solo un bloque **DB1**, el cual contiene a todos los bloques utilizados en el programa.

Bloques de funciones

Para generar un efecto de estar manipulando una estación real se optó por funciones que interpreten variables booleanas a datos int que son los encargados del movimiento en Siemens NX.

- **FC1 M1:** Es la encargada de enviar el dato tipo int para generar el movimiento de derecha a izquierda del actuador lineal.
- **FC2 M2:** Es la encargada de enviar el dato tipo int para que genere el movimiento de izquierda a derecha del actuador lineal.
- **FC3 M3:** Es la encargada de enviar un dato tipo int para que el cilindro plano genere el movimiento.
- **FC4 M4:** Es la encargada de enviar un dato tipo int para los movimientos de sujetar o soltar con la pinza.

Bloques de organización

El único bloque de organización es el **OBI**, este se ejecuta de forma cíclica mientras el PLC está funcionando.

3.4.2. Descripción del proyecto de TIA Portal para la estación de proceso

El proyecto detallado se puede encontrar en el **Anexo 2**. En esta sección se comentarán todos los bloques del programa, así como su función.

Bloques de datos

El proyecto cuenta únicamente con un bloque de datos denominado Marcas [DB1], el cual contiene las marcas utilizadas en el programa.

Bloques de funciones

Los bloques de funciones en la implementación del programa cumplen la función de convertir los valores booleanos de las variables a datos tipo entero que son los encargados e interpretados por Siemens NX.

- **FC4 AC1:** Es el encargado de enviar el dato int a Siemens NX que generara el movimiento de la mesa de indexación giratoria.
- **FC1 AC2:** Es el encargado de enviar el dato entero a Siemens NX el cual sirve para generar el accionamiento del módulo de sujeción.
- **FC3 AC3:** Este bloque de funciones, se encarga del envío de datos para el movimiento vertical del módulo de perforación.
- **FC2 AC4:** Esta función es implementada con el objetivo de enviar la señal que ejecuta el movimiento del actuador lineal perteneciente al módulo de verificación.

Bloques de organización

En la estructura de programación existe un único bloque principal o de organización, **OB1** el cual se ejecuta de manera indefinida mientras el PLC este encendido.

3.5. Comunicación de Siemens NX y PLCSIM Advanced

a. Creación de una nueva instancia en PLCSIM Advanced

Para crear una instancia en PLCSIM lo primero es plantearse una dirección IP para los equipos. Como se puede ver en la **Figura 60** se ha asignado la dirección IP **192.168.200.1** con máscara de subred **255.255.255.0**. En complemento, a esta instancia se le ha asignado el nombre **prueba**.

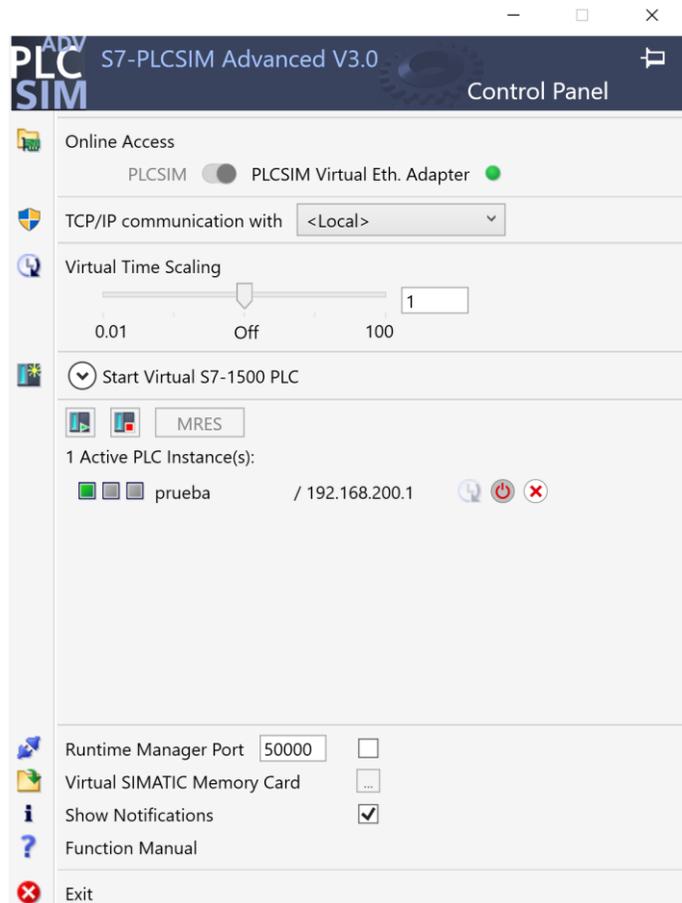


Figura 60. Creación de una instancia en PLCSIM Advanced Fuente: Autor

Este proceso se puede repetir tantas veces como estancias necesitemos siempre y cuando respetemos el rango de IPs entre ellas.

b. Carga de un proyecto en el PLC Virtual

Con la instancia creada y el proyecto de TIA Portal sin errores y compilado, se debe configurar la dirección IP del equipo dentro del menú *Configuración de dispositivos* y colocar la misma IP que de la instancia.

Luego de darle a *Cargar* en el menú de *Carga avanzada* (véase la **Figura 61**) se selecciona:

- *Interfaz PG/PC: Siemens PLCSIM Virtual Ethernet Adapter.*
- *Seleccionar dispositivo de destino: Mostrar dispositivos con direcciones idénticas.*

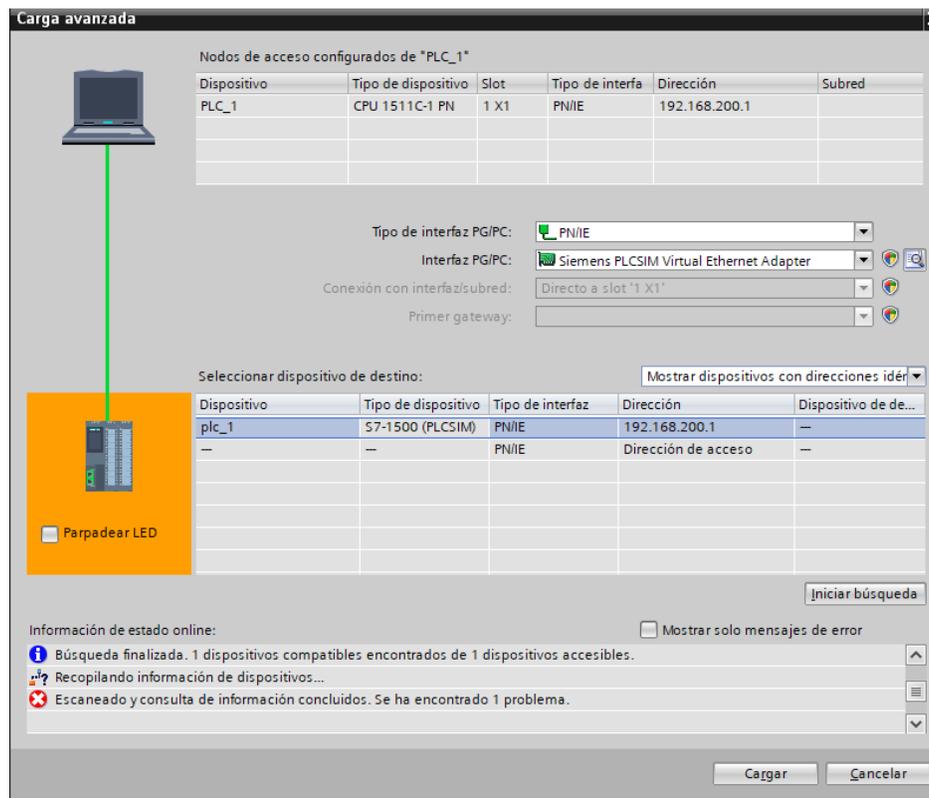


Figura 61. Manu de Carga avanzada al cargar sobre la instancia creada Fuente: Autor

Con la instancia encontrada, se debe dar clic en *Cargar* y *Finalizar*.

c. Comunicación entre Siemens NX y la instancia del PLCSIM Advanced

Para este punto se debe tener finalizado el gemelo digital en Siemens NX y el programa de control en TIA Portal debe estar cargado en una instancia de PLCSIM Advanced. Cabe recalcar que este punto es válido para las dos estaciones o para cualquier otro modelo.

En Siemens NX se debe acceder al menú *Configuración de la señal externa* (véase la **Figura 62**) en la *Cinta de opciones*. Dentro del menú se debe seleccionar la opción *PLCSIM avanzado* y seleccionar la instancia definida para el modelo. En caso de que no se muestre ninguna opción se debe dar clic sobre *Actualizar las copias registradas*.

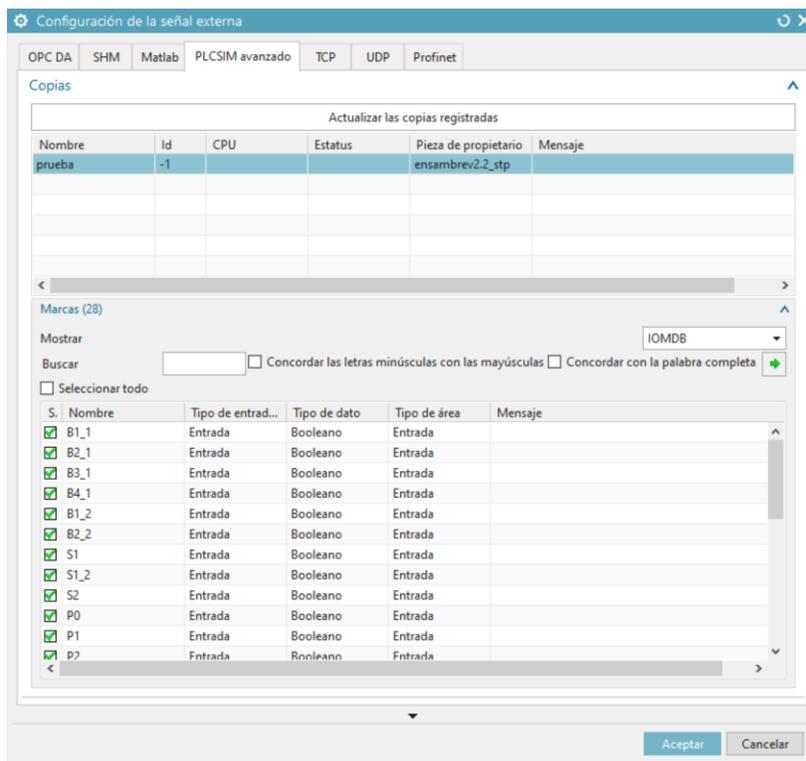


Figura 62. Menú de configuración de señal externa de siemens NX Fuente: Autor

Con la instancia seleccionada, se debe marcar las variables necesarias para el control del gemelo digital que son las relacionadas como actuadores y sensores. Finalmente se debe dar clic en *Aceptar*.

Luego de esto se tendrá todas las variables del proyecto accesibles en siemens NX. Para hacer el mapeo, es necesario ir a *Mapeo de señales* que está en la misma cinta de *Configuración de la señal externa*.

En el menú de *Mapeo de señales* (véase la **Figura 63**) hay que tener en cuenta que en el *Tipo* se haya seleccionado la opción de *PLCSIM avanzado* caso contrario las variables no aparecerán.

Luego de este proceso se presentarán dos tablas; a la izquierda estarán las variables de Siemens NX y a la derecha las variables de TIA Portal cargadas en PLCSIM Advanced. Sí se coloca los mismos nombres, es posible optar por la opción de *Realizar el mapeo automático*, caso contrario este proceso se debe hacer individual.

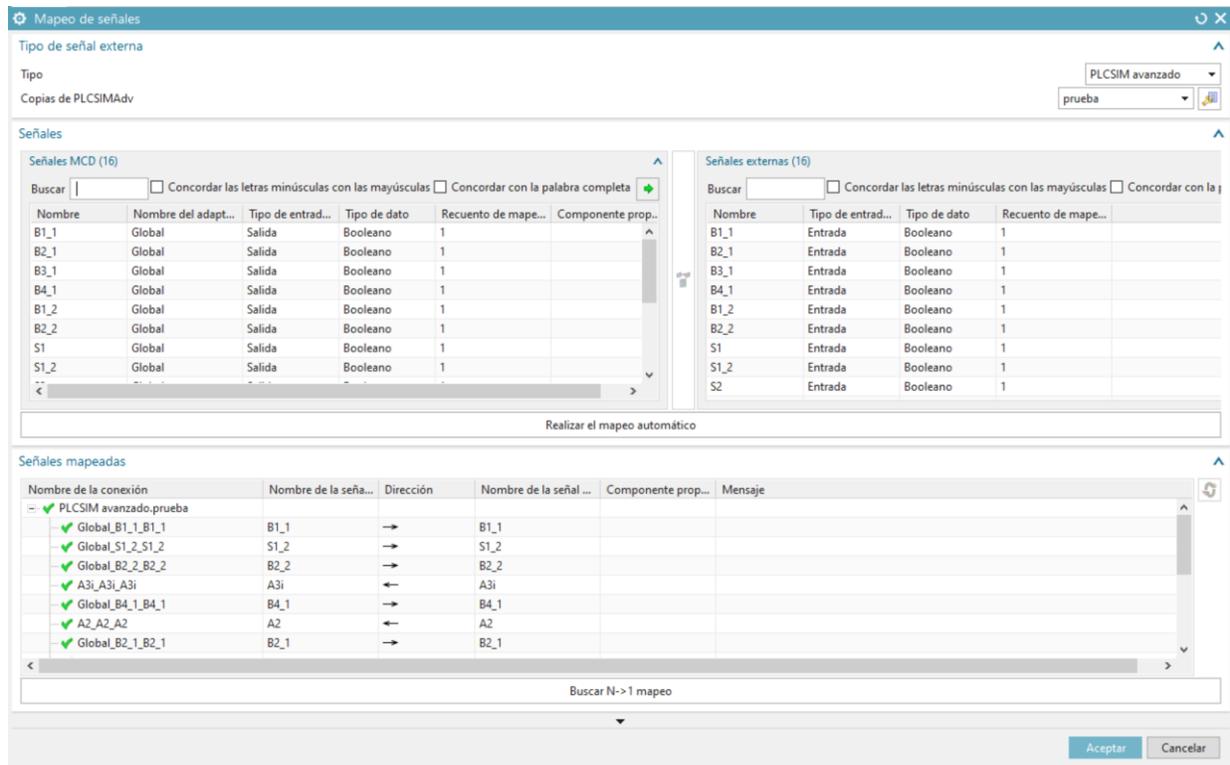


Figura 63. Menú de mapeo de señales de Siemens NX Fuente: Autor

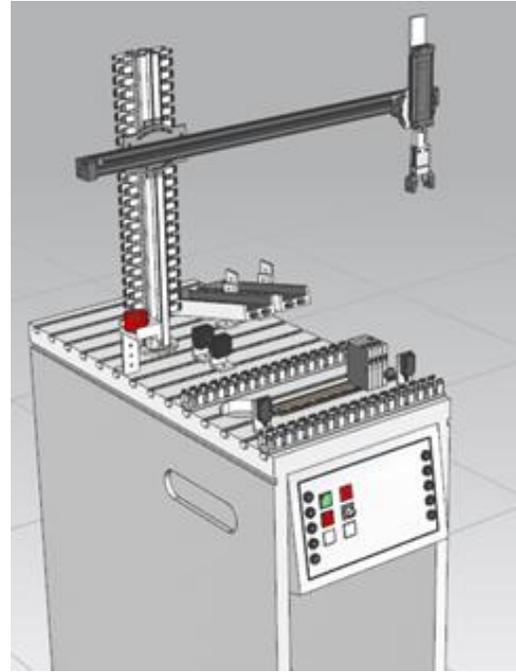
El mapeo se puede analizar en la tabla que aparece en la parte inferior, en la misma se puede desconectar las variables si es que alguna se realizó mal, así como ver el sentido de intercambio de información representado con una flecha.

3.6. Análisis y ventajas de los gemelos digitales de las estaciones de producción modular MPS 500 de Festo

Cuando se tiene como objetivo diseñar un gemelo digital hay que replicar tanto su apariencia física como su proceso, por lo que es esencial estudiar y buscar sus especificaciones técnicas, componentes y funcionamiento. En este proyecto se ha utilizado dos estaciones de Festo Didactic. Esta empresa incentiva a la industria 4.0 permitiendo al usuario acceder a manuales, descripciones y diseño CAD de cada componente que poseen; esto complementado con el hecho de que se cuenta con las estaciones físicas dentro de la universidad, permitió un diseño fiel muy cercano a la realidad.



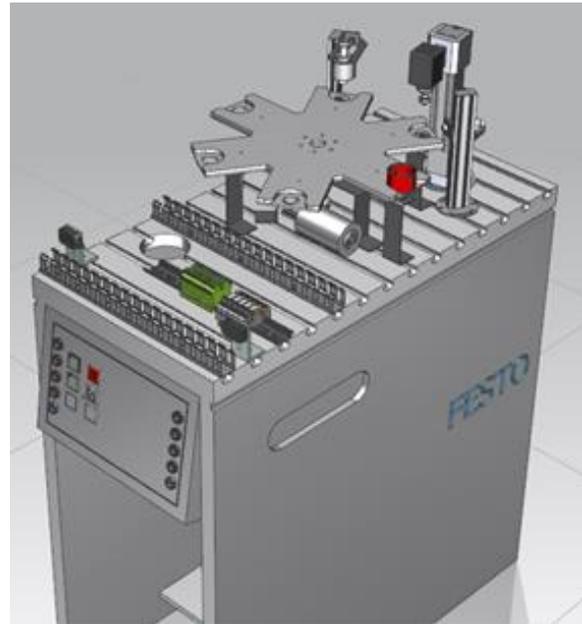
a)



b)



c)



d)

Figura 64. Estaciones del sistema de producción modular MPS 500 y sus gemelos digitales a) y c) Estaciones de manipulación y proceso reales b) y d) Gemelos digitales de la estación de manipulación y proceso respectivamente Fuente: Autor

En la **Figura 64** notamos los gemelos digitales junto a su modelo de la vida real donde se representaron todo el conjunto de piezas y componentes, la única diferencia que resalta a primera vista es el conjunto de colores escogidos, pero esto no implica un cambio significativo y mucho menos en su funcionalidad.

Para el proceso de cada estación se lo obtuvo del manual de Festo simulando un funcionamiento ideal planeado respetando cada sensor y actuador de las estaciones, esto con ayuda de las diferentes herramientas que brinda Siemens NX.

También si recordamos al inicio del proyecto se especificó que las estaciones pertenecen a un sistema de producción modular por consecuencia se pueden añadir y funcionar juntas o separadas, como se pueden ver en la **Figura 65**. Como un valor agregado al proyecto, se realizaron pruebas juntando las estaciones y verificando su funcionamiento y comportamiento.

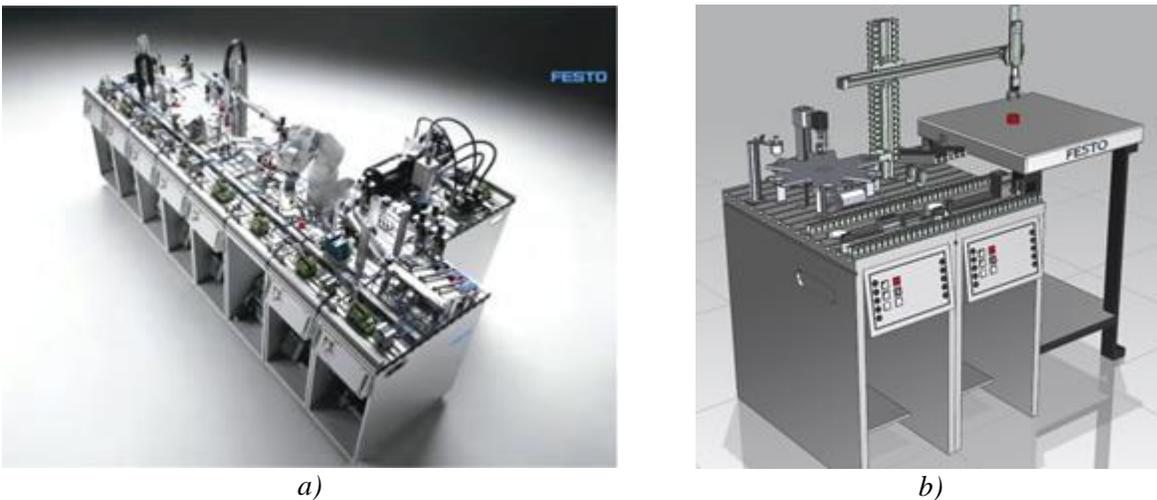


Figura 65. Sistema de producción modular MPS 500 Festo a) Estaciones del sistema de producción modular reales b) Gemelo digital de las estaciones de manipulación y producción juntas Fuente: Autor

En el proceso del diseño y análisis se observó que algunos de los componentes de las estaciones pueden ser reemplazados o mejorados de cierta forma, ya que estas estaciones tienen algunos años de su diseño. Debido a que las estaciones forman parte de material didáctico para estudiantes resulta conveniente realizar este análisis sobre su gemelo digital antes de pasarlo a su modelo real.

El control de los gemelos digitales puede ser utilizado también para controlar las estaciones reales, ya que se utilizó un conjunto de funciones para que la programación sea lo más cercana posible a lo real, teniendo en cuenta parámetros como las variables internas y externas ya que éstas están definidas por el programador y pueden cambiar a conveniencia.

Una de las ventajas de utilizar PLCSIM Advanced para la simulación es poder realizar el control de manera independiente para cada estación tanto si estas trabajan por separado como en la **Figura 66** o si se van a implementar juntas. Todo esto teniendo en cuenta el desempeño computacional, ya que si seguimos implementando estaciones y más instancias la carga computacional irá aumentando considerablemente.

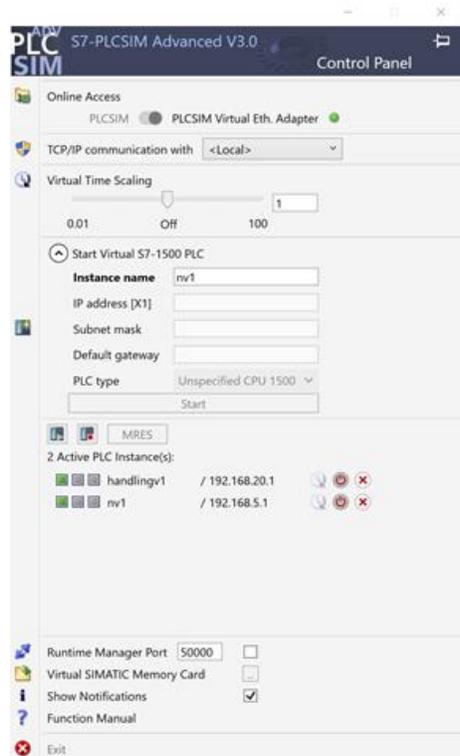


Figura 66. Configuración de la interfaz de PLCSIM en el manejo de varias instancias Fuente: Autor

CAPÍTULO 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Finalizado el modelado de las estaciones de manipulación y proceso MPS de Festo y probando diferentes simulaciones hasta lograr diferentes funcionamientos de los gemelos digitales de manera individual y grupal se logró cumplir con el objetivo principal de la propuesta de trabajo integrando distintos conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera de ingeniería electrónica con mención en sistemas industriales.

El proyecto de los gemelos digitales aborda conceptos impartidos en la carrera, como el diseño 3D en ordenador y la programación industrial en la parte de control. Generando una herramienta que permite aportar a la industria 4.0.

Se espera que el proyecto sirva como referencia para futuros trabajos de estudiantes de la carrera para llevar a digitalizar todas las estaciones modulares de MPS de Festo y en la docencia como material didáctico para la introducción del concepto y diseño de gemelos digitales. Gracias a la intuitiva programación y configuración nos permite cambiar el programa de control, modificar parámetros, movimientos u optimizar funciones y compararlas con las estaciones reales, mismas que se encuentran en la universidad.

Centrándonos en el desarrollo de los gemelos digitales una ventaja que se evidenció fue tener las estaciones reales a nuestra disposición permitiéndonos complementar la información de manuales e investigación con medidas, funcionamiento y especificaciones reales. Además, abre la posibilidad de analizar las formas factibles de optimizar diferentes procesos y aplicarlos a los gemelos digitales.

Con respecto a las pruebas de ejecución en tiempo real se observó una de las limitaciones más importantes presentes por parte de las estaciones físicas ya que estas al tener un CPU s7300 con un solo puerto de comunicación MPI limita la comunicación directa entre el gemelo digital con su estación real debido que la forma ideal de comunicación se debe realizar mediante ethernet del PLC a la tarjeta de red del PC al puerto virtual de PLCSIM Advanced generado una red ethernet entre el PLC real, simulado y la PC. Sugiriendo una actualización por parte de los PLC a una generación superior como la s71200, s71500 o por su defecto dentro de la misma familia s7300 existen versiones con puertos ethernet ya que la propia comunicación MPI limita hasta queda obsoleta si hablamos de una comunicación para gemelos digitales ya que el mismo puerto solo nos sirve para realizar la programación del PLC como otra alternativa seria hacer uso de otro controlador exterior del PLC que sea el encargado de transferir las variables de la estación real a la estación simulada.

Para finalizar como sugerencia para proyectos relacionados se recomienda analizar los recursos del computador con cual se va a trabajar ya que estos pueden verse limitados o pueden superar los recursos que

se tiene al inicio. Como referencia es recomendable tener 16 GB de RAM, un sistema operativo de 64 bits con una pantalla de resolución 1280x1024.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] C. Chute y T. French, «Introducing Care 4.0: An Integrated Care Paradigm Built on Industry 4.0 Capabilities», *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 16, p. 2247, jun. 2019, doi: 10.3390/ijerph16122247.
- [2] M. L. López Franco, S. G. Lovato Torres, G. Abad Peña, M. L. López Franco, S. G. Lovato Torres, y G. Abad Peña, «El impacto de la cuarta revolución industrial en las relaciones sociales y productivas de la industria del plástico IMPLASTIC S. A. en Guayaquil-Ecuador: retos y perspectivas», *Revista Universidad y Sociedad*, vol. 10, n.º 5, pp. 153-160, dic. 2018.
- [3] A. Calatayud y R. Katz, *Cadena de suministro 4.0: Mejores prácticas internacionales y hoja de ruta para América Latina*. Inter-American Development Bank, 2019.
- [4] J. J. Camargo-Vega, J. F. Camargo-Ortega, y L. Joyanes-Aguilar, «Conociendo Big Data», *Revista Facultad de Ingeniería*, vol. 24, n.º 38, pp. 63-77, ene. 2015.
- [5] «Análisis de Datos en Big Data: tipos y fases del análisis», *Netmind*, 8 de junio de 2016. <https://netmind.net/es/analisis-de-datos-en-big-data/> (accedido 2 de marzo de 2022).
- [6] L. J. Aguilar, «Ciberseguridad: la colaboración público-privada en la era de la cuarta revolución industrial (Industria 4.0 versus ciberseguridad 4.0)», *Cuadernos de estrategia*, n.º 185, pp. 19-64, 2017.
- [7] D. S. Lane Thames, *Cybersecurity for Industry 4.0: Analysis for Design and Manufacturing*, 1.ª ed. Springer International Publishing, 2017.
- [8] B. Hayes, «Communications of the ACM», *Cloud Computing*, vol. 57, n.º 7, pp. 9-11, 2008.
- [9] J. C. Guerrero, *CAMINAR CON ÉXITO HACIA LA INDUSTRIA 4.0*.
- [10] J. H. S. Azuela, «El papel de la inteligencia artificial en la Industria 4.0», p. 38.
- [11] J. M. M. López y V. M. Olivera, «ROBOTS AUTONOMOS: ARQUITECTURAS y CONTROL», p. 6.
- [12] E. G. Migliore, J. Z. Abad and F. Q. Palomeque, "An approach to develop a LabVIEW based augmented reality application for smartphones," *IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2016, pp. 4970-4975.

- [13] G. B. Martínez, R. A. L. Martínez, y W. G. Marroquín, «DESARROLLO DE UN GEMELO DIGITAL DE UNA FÁBRICA DE REFRESCOS: Development of a digital twin of a drink factory», *Revista Teinova*, vol. 5, pp. 40-56, 2020, doi: 10.23850/25007211.3420.
- [14] U. Karras, «CIROS® Studio 1.0 User's Guide». Dortmunder Initiative zur rechnerintegrierten Fertigung (RIF), agosto de 2008.
- [15] «CIROS Studio for 3D Factory Simulation», *VEROSIM Solutions*. <https://www.verosim-solutions.com/en/industry/ciros-studio/> (accedido 29 de abril de 2022).
- [16] M. J. M. Ayora, «Diseño de un sistema de control distribuido usando Factory IO y Codesys V3 (communication through OPC)», p. 92.
- [17] «Production Line - FACTORY I/O». <https://docs.factoryio.com/manual/scenes/production-line/> (accedido 30 de abril de 2022).
- [18] «Famic Technologies: System Design & Simulation Software». <https://www.famictech.com/> (accedido 30 de abril de 2022).
- [19] «Simulación de plantas y optimización del rendimiento | Siemens Software», *Siemens Digital Industries Software*. <https://www.plm.automation.siemens.com/global/es/products/manufacturing-planning/plant-simulation-throughput-optimization.html> (accedido 1 de mayo de 2022).
- [20] «Chapter 1: Introduction to Simulation», *Plant Simulation*. <https://plant-simulation.de/schulungen/tutorial/tutorial-chapter1/> (accedido 1 de mayo de 2022).
- [21] «gam4automation DOC |». <https://game4automation.com/documentation/current/g4aSimulation.html> (accedido 8 de mayo de 2022).
- [22] «game4automation | Simulation und Virtuelle Inbetriebnahme mit Unity», *game4automation*. <https://game4automation.com/> (accedido 8 de mayo de 2022).
- [23] «siemens-plm-pdf_tcm53-955.pdf». Accedido: 3 de marzo de 2022. [En línea]. Disponible en: https://www.plm.automation.siemens.com/media/global/de/siemens-plm-pdf_tcm53-955.pdf
- [24] «Siemens-PLM-Synchronous-technology-going-beyond-mi-63435_tcm27-28553.pdf». Accedido: 21 de febrero de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://static.sw.cdn.siemens.com/siemens-disw->

assets/public/31B3K3Gjw618c8opjQIkCQ/en-US/Siemens-PLM-Synchronous-technology-going-beyond-mi-63435_tcm27-28553.pdf

[25] «¿Qué es la ingeniería basada en el conocimiento?» <https://www.netinbag.com/es/science/what-is-knowledge-based-engineering.html> (accedido 21 de febrero de 2022).

[26] Yumpu.com, «NX overview (Spanish) - Siemens PLM Software», *yumpu.com*. <https://www.yumpu.com/es/document/read/25392356/nx-overview-spanish-siemens-plm-software> (accedido 21 de febrero de 2022).

[27] «MCD_Quick_Start.pdf». Accedido: 21 de febrero de 2022. [En línea]. Disponible en: http://www2.me.rochester.edu/courses/ME204/nx_help/en_US/graphics/fileLibrary/nx/mechtronics/MCD_Quick_Start.pdf

[28] «TIA Portal», *siemens.com Global Website*. <https://new.siemens.com/global/en/products/automation/industry-software/automation-software/tia-portal.html> (accedido 21 de febrero de 2022).

[29] «Advantages Switch to TIA Portal», *van Daal engineering*, 15 de noviembre de 2017. <https://www.vdaal.nl/voordelen-overstap-naar-tia-portal/?lang=en> (accedido 21 de febrero de 2022).

[30] D. García, «Introducción a S7-PLCSIM Advanced y tablas de simulación (En)». <https://www.infopl.net/descargas/107-siemens/software-step7-tiaportal/tia-portal/2850-s7-plcsim-advanced-tablas-simulacion> (accedido 21 de febrero de 2022).

[31] «TFG_ALBERTO_DE_LA_MERCED_DE_USERA.pdf». Accedido: 21 de febrero de 2022. [En línea]. Disponible en: https://oa.upm.es/54134/1/TFG_ALBERTO_DE_LA_MERCED_DE_USERA.pdf

[32] Martínez, Geraldine Bolaños, Ronny Alexi Londoño Martínez, and William Gutiérrez Marroquín. "DESARROLLO DE UN GEMELO DIGITAL DE UNA FÁBRICA DE REFRESCOS: Development of a digital twin of a drink factory." *Revista Teinnova* 5 (2020): 40-56.

[33] García Simarro, María Paz. "Modelado, simulación y control de un gemelo digital de una máquina de montaje de rodamientos." (2021).

[34] SIEMENS PLC Software. "Mechatronic Concep Desing." [En línea]. Available: http://www2.me.rochester.edu/courses/ME204/nx_help/en_US/graphics/fileLibrary/nx/mechtronics/MCD_Quick_Start.pdf

- [35] SIEMENS. "Documentacion didactica / para cursos de formación." [En línea]. Available: <https://www.automation.siemens.com/sce-static/learning-training-documents/tia-portal/digital-twin/sce-150-004-mcd-tia-com-digital-twin-at-education-static-model-nx-hs-darmstadt-1219-es.pdf>
- [36] Lechler, Tobias, et al. "Virtual Commissioning–Scientific review and exploratory use cases in advanced production systems." *Procedia CIRP* 81 (2019): 1125-1130.
- [37] de Usera, Alberto de la Merced, and Juan de Dios Sanz Bobi. "DESARROLLO DE UN GEMELO DIGITAL Y ANÁLISIS DE SU IMPACTO." (2019).
- [38] Artetxe Lázaro, Eneko. "Modelado y control en simulación de la estación FMS-201 para inyección de fallos." (2019).
- [39] Bosque Peón, Carolina del. "Los gemelos digitales en la industria 4.0." (2019).
- [40] Barrio Lagándara, Víctor del. "Diseño y programación de varias estaciones de trabajo mediante el uso de PLC y softwares específicos." (2017).
- [41] Sáez Serrano, Alonso. "Diseño e implementación de un gemelo digital de un proceso de fabricación automatizado y supervisado remotamente." (2020).
- [42] Ortega Cely, Victor Virgilio, and Ulises Aquiles Núñez Antón. *Diseño e Implementación de un Sistema de Supervisión y Control Didáctico para el Laboratorio de Fabricación Flexible-MPS de la UPS-G*. BS thesis. 2013.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Descripción grafica de la línea de tiempo de la revolución industrial [1].	1
Figura 2. Procesamiento de Big Data [5].	3
Figura 3. Interfaz del software Ciro's Studio y modelamiento 3D del proceso de fabricación de Aros para llantas de un automóvil [15].	7
Figura 4. Simulación 3D de una línea de producción con bandas transportadoras, células de fabricación, brazos robóticos y sistema de mandos [17].	8
Figura 5. Vista de interfaz y ejemplo de simulación en PLC con el uso de la herramienta Automation Studio [18].	9
Figura 6. Interfaz de software Plant Simulation [19].	9
Figura 7. Desarrollo de un gemelo digital y simulación de un proceso industrial usando Game4Automation de Unity [21].	10
Figura 8. Flujo de diseño de trabajo MCD	14
Figura 9. Barra de recursos (Recuadro rojo) y Cinta de opciones (Recuadro Azul) de Siemens NX Fuente: Siemens NX.	17
Figura 10. Navegador de física de Siemens NX Fuente: Siemens NX	18
Figura 11. Navegador de ensamble de Siemens NX Fuente: Siemens NX.	19
Figura 12. Inspector de tiempo de ejecución de Siemens NX Fuente: Siemens NX.	20
Figura 13. Editor de secuencia de Siemens NX Fuente: Siemens NX.	20
Figura 14. Preferencia del diseñador de concepto de mecatrónica de Siemens NX Fuente: Siemens NX.	21
Figura 15. Manu de Cuerpo rígido de Siemens NX Fuente: Siemens NX.	22
Figura 16. Menú de Cuerpo de colisión de Siemens NX Fuente: Siemens NX.	23
Figura 17. Menú de Sensor de colisión de Siemens NX Fuente: Siemens NX.	25
Figura 18. Manu de Fuente de objetos de Siemens NX Fuente: Siemens NX.	26
Figura 19. Menú de Junta fija de Siemens NX Fuente: Siemens NX.	26
Figura 20. Menú de Junta deslizante de Siemens NX Fuente: Siemens NX.	27
Figura 21. Menú de Junta charnela de Siemens NX Fuente: Siemens NX.	28
Figura 22. Control de posición en la pantalla del Inspector de parámetros de Siemens NX Fuente: Siemens NX.	29
Figura 23. Menú de Interruptor limitador de Siemens NX Fuente: Siemens NX.	30
Figura 24. Proceso de Adaptador de señales de un Control de posición de Siemens NX Fuente: Siemens NX.	31
Figura 25. Estación de manipulación	39

Figura 26. Base de la estación de manipulación Fuente: Autor.....	40
Figura 27. Pieza roja Fuente: Autor	41
Figura 28. Físicas básicas de la pieza Fuente: Autor.....	43
Figura 29. Físicas básicas de la base de la estación de manipulación Fuente: Autor.....	44
Figura 30. Junta fija de la base de la estación de manipulación Fuente: Autor	44
Figura 31. Acopladores de la Base al Actuador lineal Fuente: Autor.....	45
Figura 32. Físicas básicas del Actuador lineal Fuente: Autor	46
Figura 33. Juntas y restricciones del actuador lineal a) Junta deslizante b) Junta fija de la base con el actuador lineal Fuente: Autor.....	46
Figura 34. Acoples entre el Actuador lineal y el Cilindro plano. Fuente: Autor	47
Figura 35. Físicas básicas del Cilindro plano Fuente: Autor	47
Figura 36. Juntas y restricciones del Cilindro plano a) Junta deslizante del Cilindro plano b) Junta fija entre el Actuador lineal y el Cilindro plano Fuente: Autor	48
Figura 37. Acople entre el Cilindro plano y la Pinza Fuente: Autor.....	48
Figura 38. Físicas básicas de la Pinza Fuente: Autor	49
Figura 39. Juntas y restricciones de la Pinza a) Junta deslizante derecha de la pinza b) Juntas deslizantes invertidas de la Pinza Fuente: Autor	50
Figura 40. Terminales para la Pinza Fuente: Autor.....	50
Figura 41. Sensores y actuadores de la estación de manipulación Fuente: Autor.....	51
Figura 42. Estación de proceso Fuente: Autor	54
Figura 43. Base de la estación de proceso Fuente: Autor.....	54
Figura 44. Físicas básicas de la base de la estación de proceso Fuente: Autor.....	59
Figura 45. Juntas y restricciones de la base de la estación de proceso Fuente: Autor	59
Figura 46. Acoplador del módulo de verificación con la base Fuente: Autor.....	60
Figura 47. Acoplador de la mesa de indexación giratoria con la base Fuente: Autor	60
Figura 48. Acoplador del módulo de perforación con la base Fuente: Autor	61
Figura 49. Acoplador del módulo de sujeción con la base Fuente: Autor	62
Figura 50. Físicas básicas de la mesa de indexación giratoria a) El elemento móvil b) El elemento fijo Fuente: Autor.....	62
Figura 51. Juntas y restricciones de la Mesa de indexación giratoria a) Junta charnela en el elemento móvil b) Junta fija en el elemento fijo Fuente: Autor.....	63
Figura 52. Acoplador plano de mesa giratoria de indexación Fuente: Autor.....	64

Figura 53. Físicas básicas para el módulo de verificación a) Vástago del cilindro electro neumático como cuerpo rígido b) Cuerpo del cilindro electro neumático c) Soporte y sensor definidos como cuerpo rígidos d) Extremo final del vástago como cuerpo de colisión Fuente: Autor.....	65
Figura 54. Juntas y restricciones del módulo de verificación a) Junta fija entre el modulo y la base b) Junta deslizante al vástago del cilindro electro neumático Fuente: Autor	66
Figura 55. Físicas básicas del módulo de perforación a) Base de recorrido del taladro b) Taladro c) Sensor 3B2 e) Definición como cuerpo de colisión la cara anterior al taladro Fuente: Autor	67
Figura 56. Junta y restricciones del módulo de perforación a) Junta fija al carril del taladro b) Junta deslizante asignada al cuerpo del taladro c) y d) Son juntas fijas a los sensores fin de carrera Fuente: Autor	68
Figura 57. Físicas básicas del módulo de sujeción a) y b) como cuerpos rígidos al cuerpo y vástago del cilindro electro neumático respectivamente c) Cuerpo de colisión a la cara extrema del vástago Fuente: Autor.....	69
Figura 58. Juntas y restricciones del módulo de sujeción a) Junta deslizante al vástago b) Junta fija al cuerpo del cilindro Fuente: Autor	70
Figura 59. Sensores y actuadores de la estación de proceso Fuente: Autor	70
Figura 60. Creación de una instancia en PLCSIM Advanced Fuente: Autor.....	73
Figura 61. Manu de Carga avanzada al cargar sobre la instancia creada Fuente: Autor	74
Figura 62. Menú de configuración de señal externa de siemens NX Fuente: Autor	75
Figura 63. Menú de mapeo de señales de Siemens NX Fuente: Autor	76
Figura 64. Estaciones del sistema de producción modular MPS 500 y sus gemelos digitales a) y c) Estaciones de manipulación y proceso reales b) y d) Gemelos digitales de la estación de manipulación y proceso respectivamente Fuente: Autor	77
Figura 65. Sistema de producción modular MPS 500 Festo a) Estaciones del sistema de producción modular reales b) Gemelo digital de las estaciones de manipulación y producción juntas Fuente: Autor	78
Figura 66. Configuración de la interfaz de PLCSIM en el manejo de varias instancias Fuente: Autor	79

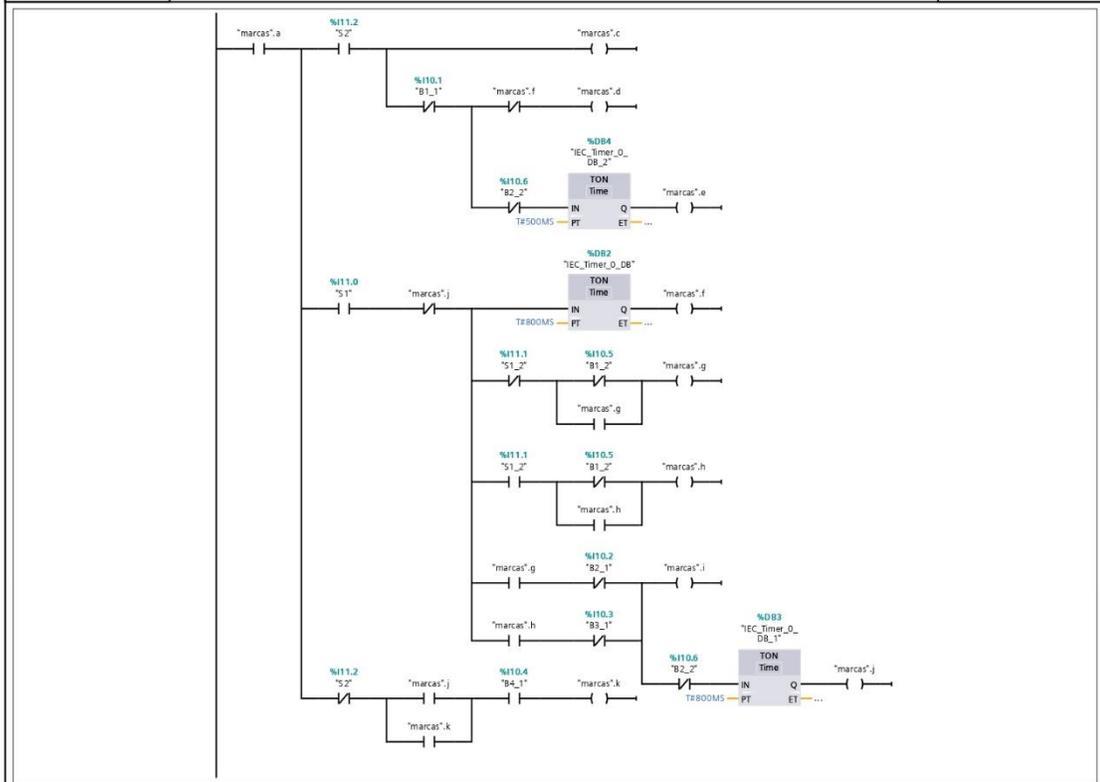
ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Modelado y ensamble del cilindro plano de la estación de manipulación	32
Tabla 2. Actuadores de la estación de manipulación.....	41
Tabla 3. Especificación de los sensores y actuadores de la estación de manipulación Fuente: Autor	51
Tabla 4. Mapeo de las variables de la estación de manipulación Fuente: Autor	52
Tabla 5. Actuadores de la estación de proceso Fuente: Autor	55
Tabla 6. Especificación de los sensores y actuadores de la estación de proceso Fuente: Autor	70
Tabla 7. Mapeo de las variables de la estación de proceso Fuente: Autor.....	71

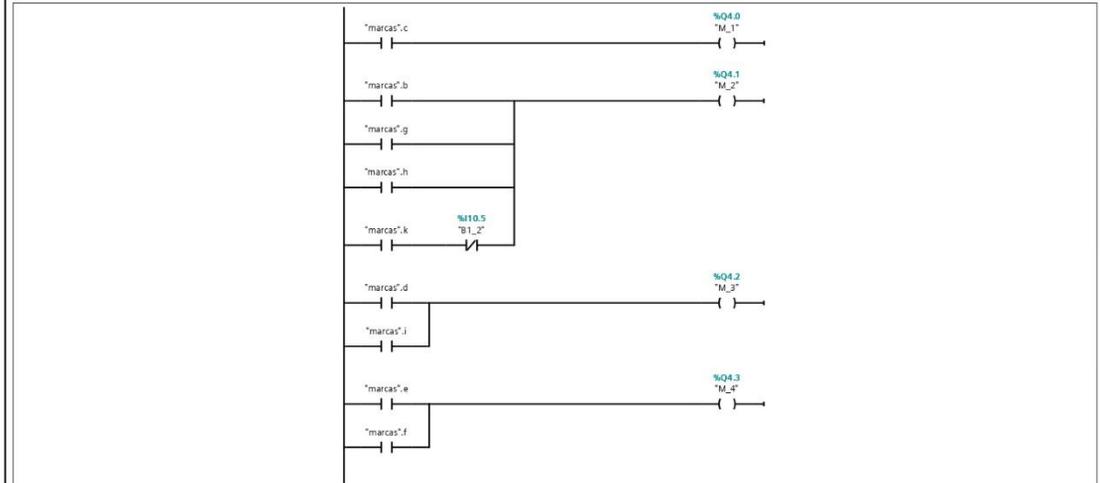
ANEXO 1. PROYECTO DE LA ESTACION DE MANIPULACIÓN EN TIA PORTAL

- Estructura de programación para la estación de manipulación, bloque MAIN.

Totally Integrated Automation Portal					
Proyecto1 / PLC_1 [CPU 1511C-1 PN] / Bloques de programa					
Main [OB1]					
Main Propiedades					
General					
Nombre	Main	Número	1	Tipo	OB
Numeración	Automático			Idioma	KOP
Información					
Título	"Main Program Sweep (Cycle)"	Autor		Comentario	
Versión	0.1	ID personalizada		Familia	
Main					
Nombre		Tipo de datos	Valor predet.	Comentario	
▼ Input					
Initial_Call		Bool		Initial call of this OB	
Remanence		Bool		=True, if remanent data are available	
Temp					
Constant					
Segmento 1: inicializacion					
Segmento 2:					
Segmento 3:					



Segmento 4:



- Estructura de programación para la estación de manipulación, bloque FUNCIÓN M1.

Totally Integrated Automation Portal					
Proyecto1 / PLC_1 [CPU 1511C-1 PN] / Bloques de programa					
M1 [FC1]					
M1 Propiedades					
General					
Nombre	M1	Número	1	Tipo	FC
Numeración	Automático			Idioma	KOP
Información					
Título		Autor		Comentario	
Versión	0.1	ID personalizada		Familia	
M1					
Nombre	Tipo de datos	Valor predet.	Comentario		
Input					
Output					
InOut					
Temp					
Constant					
▼ Return					
M1	Void				
Segmento 1:					

- Estructura de programación para la estación de manipulación, bloque FUNCIÓN M2.

Totally Integrated Automation Portal							
Proyecto1 / PLC_1 [CPU 1511C-1 PN] / Bloques de programa M2 [FC2]							
M2 Propiedades							
General							
Nombre	M2	Número	2	Tipo	FC	Idioma	KOP
Numeración	Automático						
Información							
Título		Autor		Comentario		Familia	
Versión	0.1	ID personalizada					
M2							
Nombre		Tipo de datos		Valor predet.	Comentario		
Input							
Output							
InOut							
Temp							
Constant							
▼ Return							
M2		Void					
Segmento 1:							

- Estructura de programación para la estación de manipulación, bloque FUNCIÓN M3.

Totally Integrated Automation Portal							
Proyecto1 / PLC_1 [CPU 1511C-1 PN] / Bloques de programa							
M3 [FC3]							
M3 Propiedades							
General							
Nombre	M3	Número	3	Tipo	FC	Idioma	KOP
Numeración	Automático						
Información							
Título		Autor		Comentario		Familia	
Versión	0.1	ID personalizada					
M3							
Nombre		Tipo de datos		Valor predet.	Comentario		
Input							
Output							
InOut							
Temp							
Constant							
▼ Return							
M3		Void					
Segmento 1:							

- Estructura de programación para la estación de manipulación, bloque FUNCIÓN M4.

Totally Integrated Automation Portal							
Proyecto1 / PLC_1 [CPU 1511C-1 PN] / Bloques de programa M4 [FC4]							
M4 Propiedades							
General							
Nombre	M4	Número	4	Tipo	FC	Idioma	KOP
Numeración	Automático						
Información							
Título		Autor		Comentario		Familia	
Versión	0.1	ID personalizada					
M4							
Nombre	Tipo de datos	Valor predet.	Comentario				
Input							
Output							
InOut							
Temp							
Constant							
▼ Return							
M4	Void						
Segmento 1:							

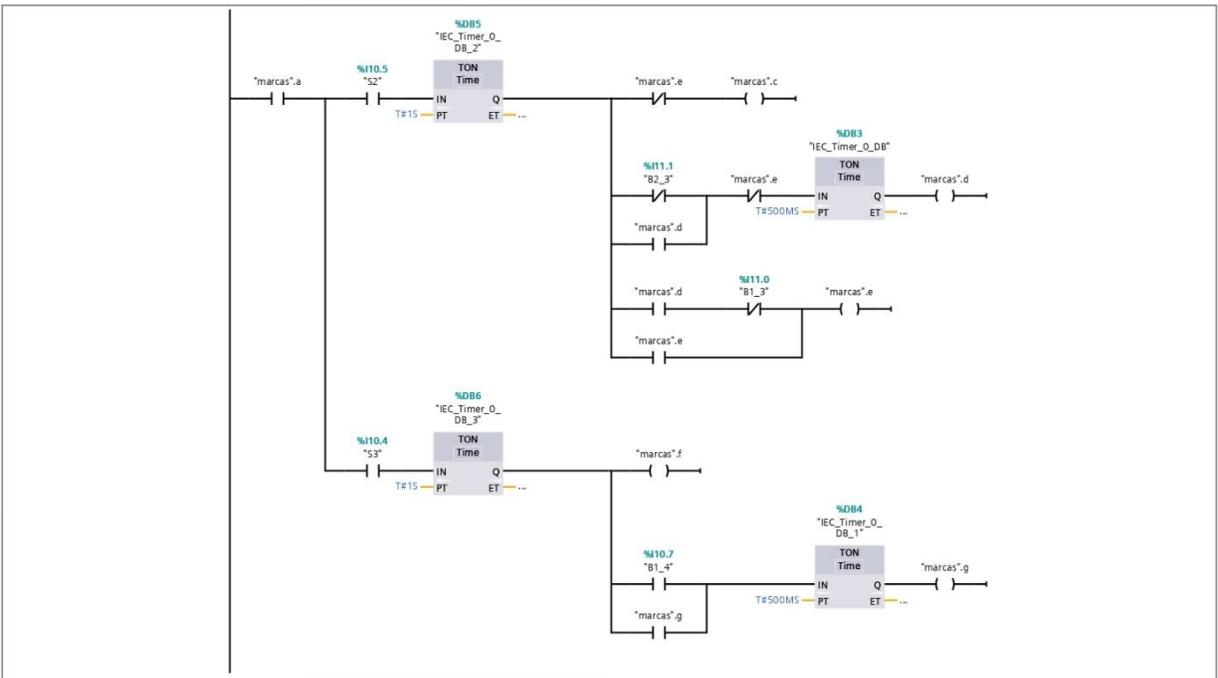
- Estructura de programación para la estación de manipulación, variables utilizadas.

Totally Integrated Automation Portal								
Proyecto1 / PLC_1 [CPU 1511C-1 PN] / Variables PLC								
Tabla de variables estándar [77]								
Variables PLC								
	Nombre	Tipo de datos	Dirección	Remanencia	Accesible desde HMI/OPC UA	Escribible desde HMI/OPC UA	Visible en Supervisión HMI Engineering	Comentario
	A1	Int	%MW0	False	True	True	True	
	P0	Bool	%I1.3	False	True	True	True	
	P1	Bool	%I1.4	False	True	True	True	
	M_1	Bool	%Q4.0	False	True	True	True	
	B1_1	Bool	%I10.1	False	True	True	True	
	B2_1	Bool	%I10.2	False	True	True	True	
	B3_1	Bool	%I10.3	False	True	True	True	
	B4_1	Bool	%I10.4	False	True	True	True	
	M_2	Bool	%Q4.1	False	True	True	True	
	P2	Bool	%I1.5	False	True	True	True	
	M_3	Bool	%Q4.2	False	True	True	True	
	A2	Int	%MW2	False	True	True	True	
	M_4	Bool	%Q4.3	False	True	True	True	
	B1_2	Bool	%I10.5	False	True	True	True	
	B2_2	Bool	%I10.6	False	True	True	True	
	A3d	Int	%MW4	False	True	True	True	
	A3i	Int	%MW6	False	True	True	True	
	S1	Bool	%I1.0	False	True	True	True	
	S1_2	Bool	%I1.1	False	True	True	True	
	S2	Bool	%I1.2	False	True	True	True	

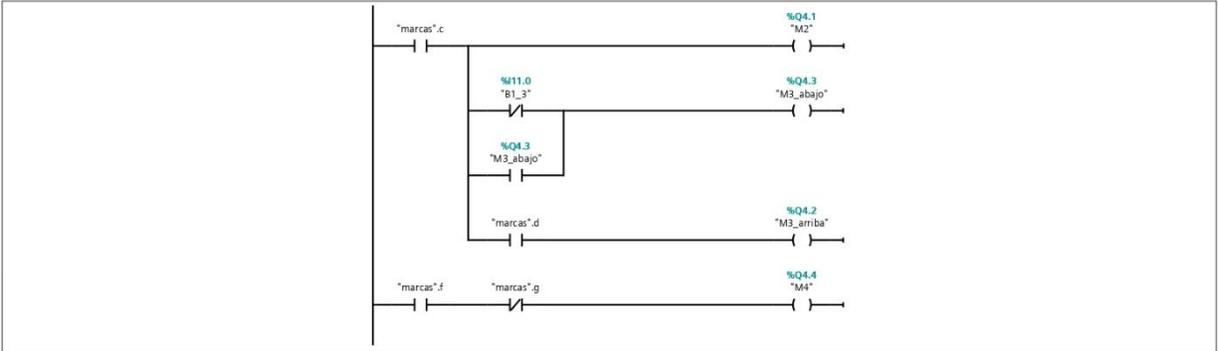
ANEXO 2. PROYECTO DE LA ESTACIÓN DE PROCESO EN TIA PORTAL

- Estructura de programación para la estación de manipulación, bloque MAIN.

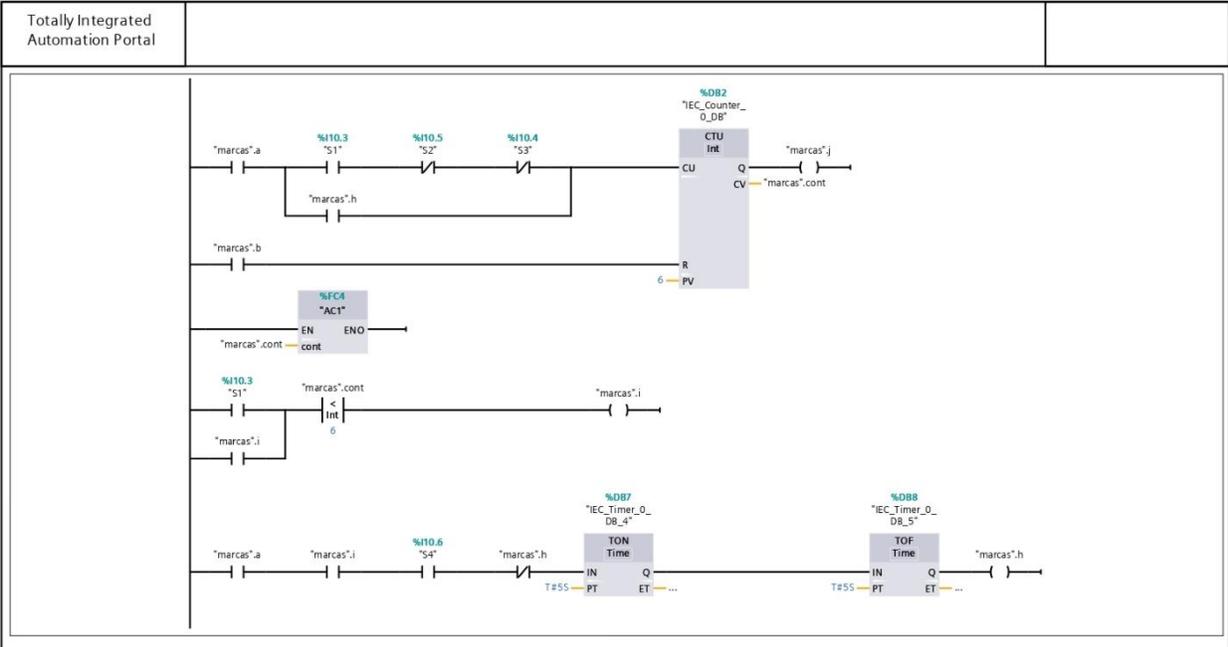
Totally Integrated Automation Portal					
naranjov2 / PLC_1 [CPU 1511C-1 PN] / Bloques de programa					
Main [OB1]					
Main Propiedades					
General					
Nombre	Main	Número	1	Tipo	OB
Idioma	KOP				
Numeración	Automático				
Información					
Título	"Main Program Sweep (Cycle)"	Autor		Comentario	
Familia					
Versión	0.1	ID personalizada			
Main					
Nombre		Tipo de datos	Valor predet.	Comentario	
▼ Input					
Initial_Call		Bool		Initial call of this OB	
Remanence		Bool		=True, if remanent data are available	
Temp					
Constant					
Segmento 1:					
Segmento 2:					
Segmento 3:					



Segmento 4:



Segmento 5:



- Estructura de programación para la estación de manipulación, bloque FUNCIÓN M1.

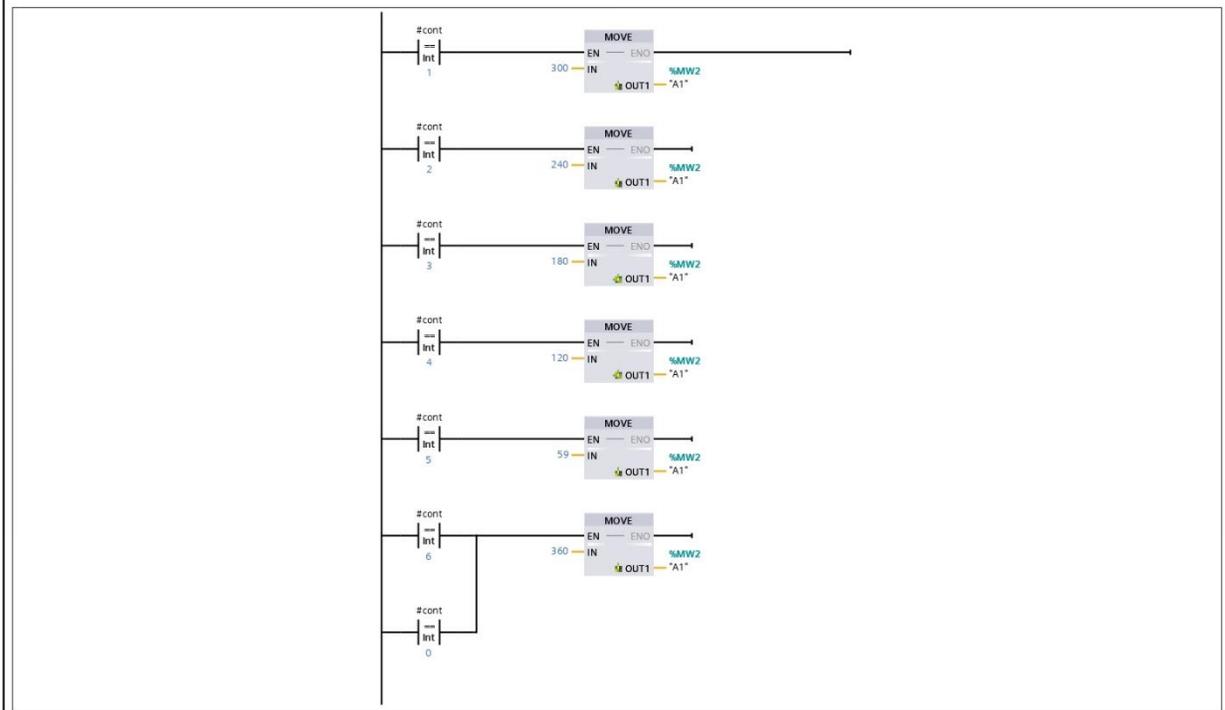
naranjov2 / PLC_1 [CPU 1511C-1 PN] / Bloques de programa

AC1 [FC4]

AC1 Propiedades							
General							
Nombre	AC1	Número	4	Tipo	FC	Idioma	KOP
Numeración	Automático						
Información							
Título		Autor		Comentario		Familia	
Versión	0.1	ID personalizada					

AC1			
Nombre	Tipo de datos	Valor predet.	Comentario
▼ Input			
cont	Int		
Output			
InOut			
Temp			
Constant			
▼ Return			
AC1	Void		

Segmento 1:



- Estructura de programación para la estación de manipulación, bloque FUNCIÓN M2.

naranjov2 / PLC_1 [CPU 1511C-1 PN] / Bloques de programa

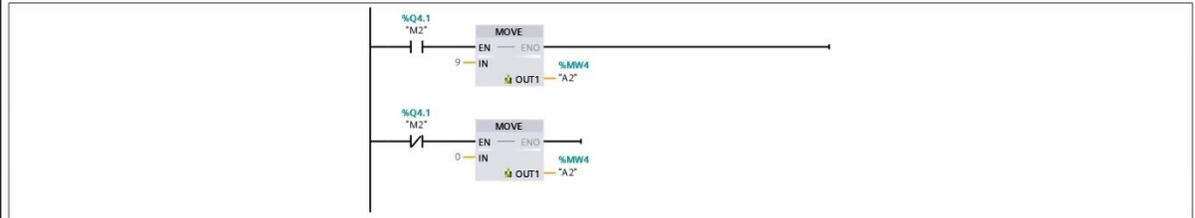
AC2 [FC1]

AC2 Propiedades

General							
Nombre	AC2	Número	1	Tipo	FC	Idioma	KOP
Numeración	Automático						
Información							
Título		Autor		Comentario		Familia	
Versión	0.1	ID personalizada					

AC2			
Nombre	Tipo de datos	Valor predet.	Comentario
Input			
Output			
InOut			
Temp			
Constant			
▼ Return			
AC2	Void		

Segmento 1:



- Estructura de programación para la estación de manipulación, bloque FUNCIÓN M3.

Totally Integrated Automation Portal					
--------------------------------------	--	--	--	--	--

naranjov2 / PLC_1 [CPU 1511C-1 PN] / Bloques de programa

AC3 [FC3]

AC3 Propiedades

General					
Nombre	AC3	Número	3	Tipo	FC
Numeración	Automático				
Información					
Título		Autor		Comentario	
Versión	0.1	ID personalizada		Familia	

AC3

Nombre	Tipo de datos	Valor predet.	Comentario
Input			
Output			
InOut			
Temp			
Constant			
▼ Return			
AC3	Void		

Segmento 1:

- Estructura de programación para la estación de manipulación, bloque FUNCIÓN M4.

Totally Integrated Automation Portal							
naranjov2 / PLC_1 [CPU 1511C-1 PN] / Bloques de programa							
AC4 [FC2]							
AC4 Propiedades							
General							
Nombre	AC4	Número	2	Tipo	FC	Idioma	KOP
Numeración	Automático						
Información							
Título		Autor		Comentario		Familia	
Versión	0.1	ID personalizada					
AC4							
Nombre	Tipo de datos	Valor predet.	Comentario				
Input							
Output							
InOut							
Temp							
Constant							
▼ Return							
AC4	Void						
Segmento 1:							

- Estructura de programación para la estación de manipulación, variables utilizadas.

naranjov2 / PLC_1 [CPU 1511C-1 PN]

Variables PLC

Nombre	Tipo de datos	Dirección	Remanencia	Accesible desde HMI/OPC UA	Escribible desde HMI/OPC UA	Visible en Supervisión HMI Engineering	Comentario
 P0	Bool	%I10.0	False	True	True	True	
 P1	Bool	%I10.1	False	True	True	True	
 P2	Bool	%I10.2	False	True	True	True	
 S1	Bool	%I10.3	False	True	True	True	
 S3	Bool	%I10.4	False	True	True	True	
 S2	Bool	%I10.5	False	True	True	True	
 S4	Bool	%I10.6	False	True	True	True	
 B1_4	Bool	%I10.7	False	True	True	True	
 B1_3	Bool	%I11.0	False	True	True	True	
 B2_3	Bool	%I11.1	False	True	True	True	
 A1	Int	%MW2	False	True	True	True	
 A2	Int	%MW4	False	True	True	True	
 A3	Int	%MW6	False	True	True	True	
 A4	Int	%MW8	False	True	True	True	
 M1	Bool	%Q4.0	False	True	True	True	
 M2	Bool	%Q4.1	False	True	True	True	
 M3_arriba	Bool	%Q4.2	False	True	True	True	
 M3_abajo	Bool	%Q4.3	False	True	True	True	
 M4	Bool	%Q4.4	False	True	True	True	