

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA INDUSTRIAL

## TRABAJO FIN DE GRADO

***MODELADO Y CONTROL EN SIMULACIÓN DE  
LA ESTACIÓN ALMACÉN DE LA CÉLULA FMS  
200 EN LA PLATAFORMA NX-MCD***

**Alumno:** Manzanares Domínguez, Ignacio

**Director:** Orive Revillas, Darío

**Curso:** 2018-2019

**Fecha:** Bilbao, 13, Junio, 2019

## ÍNDICE

ÍNDICE .....	2
LISTADO DE ILUSTRACIONES Y TABLAS.....	4
1. RESUMEN TRILINGÜE .....	6
2. INTRODUCCIÓN .....	7
3. CONTEXTO Y ANTECEDENTES.....	8
4. OBJETIVOS Y ALCANCE .....	10
5. BENEFICIOS APORTADOS POR EL PROYECTO .....	12
5.1. Beneficios económicos .....	12
5.2. Beneficios de seguridad.....	13
6. ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE .....	14
6.1. Célula FMS 200:.....	14
6.2. Equipos de control:.....	16
6.3. Herramientas software:.....	17
7. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS .....	19
8. ANÁLISIS DE RIESGOS .....	20
I. Datos erróneos en el diseño .....	20
II. Errores en el Software .....	21
III. Exceso de confianza en la simulación .....	21
IV. Pérdida de datos.....	22
V. Defectos ocultos en la máquina real.....	22
8.1. Matriz de riesgos .....	23
9. DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA.....	24
9.1. PROYECTO TIA PORTAL. DISEÑO.....	25
9.1.1. Configuración del Objeto Tecnológico.....	30
9.2. NX-MCD.....	40
9.3. SIMIT V10.0 .....	42
9.4. Proyecto TIA Portal. Aplicación.....	48
9.5. Simulación .....	49
10. METODOLOGÍA SEGUIDA EN EL DESARROLLO DEL TRABAJO .....	51
10.1. Diagrama de Gantt .....	52

11.	DESCARGO DE GASTOS .....	53
11.1.	Horas internas .....	53
11.2.	Amortizaciones .....	53
11.3.	Gastos.....	53
11.4.	Costes indirectos .....	53
11.5.	Costes totales .....	54
11.6.	Costes relativos.....	54
12.	CONCLUSIONES.....	55
	Bibliografía .....	56
	ANEXO I. PRUEBAS REALIZADAS CON UN EJE REAL .....	57
	I. Control manual del eje de posición actuando directamente sobre el variador de frecuencia desde el “Panel de control” de TIA Portal. ....	57
	II. Control manual del eje actuando directamente sobre el Objeto Tecnológico ejecutándose en el PLC desde el “Panel de mando” del OT. ....	67
	III. Control del eje de posición desde un programa de control en el PLC real utilizando los FBs de la librería de Motion Control y la comunicación vía Profinet IO. ....	73

## LISTADO DE ILUSTRACIONES Y TABLAS

Tabla 1. Tabla de probabilidad .....	20
Tabla 2. Tabla de severidad .....	20
Tabla 3. Matriz de riesgos .....	23
Tabla 4. Telegrama 3 de PROFIdrive.....	24
Tabla 5. Palabras del telegrama 3.....	25
Tabla 6. Parámetros del objeto tecnológico de posición.....	39
Tabla 7. Costes totales.....	54
Tabla 8. Parámetros del accionamiento .....	64
Ilustración 1. Modelos desarrollados el curso 2017/2018.....	9
Ilustración 2. Esquema de la conexión empleada para este proyecto.....	10
Ilustración 3. Prueba destructiva del motor aeronáutico General Electric GE90 .....	12
Ilustración 4. Célula FMS 200 del laboratorio de automática.....	14
Ilustración 5. Estación almacén .....	15
Ilustración 6. Variador de frecuencia y motor empleados en las pruebas.....	16
Ilustración 7. PLC SIMATIC de la gama S7 1500.....	17
Ilustración 8. Interfaz del S7-PLCSIM Advanced 2.0 SP1.....	18
Ilustración 9. Accionamiento y telegrama 3 desde la vista de dispositivos de TIA Portal .....	26
Ilustración 10. Estructura de carpetas del proyecto TIA Portal .....	26
Ilustración 11. Palabras del telegrama 3 en la tabla de variables del proyecto .....	27
Ilustración 12. FBs de Motion Control para control de posición .....	29
Ilustración 13. Opción de simulación del proyecto TIA Portal .....	30
Ilustración 14. Conexión con el accionamiento .....	31
Ilustración 15. Intercambio de datos con el accionamiento.....	31
Ilustración 16. Intercambio de datos con el encóder .....	32
Ilustración 17. Parámetros avanzados/Mecánica .....	32
Ilustración 18. Preajuste de los parámetros avanzados .....	33
Ilustración 19. Parámetros avanzados/Límites dinámicos.....	33
Ilustración 20. Parámetros avanzados/Preajuste de dinámica .....	34
Ilustración 21. Referenciado activo .....	35
Ilustración 22. Referenciado pasivo .....	36
Ilustración 23. Error de seguimiento .....	37
Ilustración 24. Tiempo de tolerancia .....	38
Ilustración 25. Modelo en MCD.....	40
Ilustración 26. Speed Control .....	41
Ilustración 27. Acoplamiento con PLCSim Advanced.....	42
Ilustración 28. Variables Input (Output del PLC) importadas en SIMIT, entre las que se encuentran las palabras de respuesta del telegrama 3. ....	43
Ilustración 29. Acoplamiento con MCD .....	44
Ilustración 30. Tabla de variables del modelo NX-MCD en SIMIT .....	45
Ilustración 31. Bloques PROFIdrive 2 y Sinamics .....	46

Ilustración 32. Bloques SensorProcessRotatory y Sensor.....	46
Ilustración 33. Bloques en SIMIT con las variables de NX-MCD y TIA Portal.....	47
Ilustración 34. Etapas 11 y 12 de la programación, con sus transiciones.....	49
Ilustración 35. Tabla de monitorización de SIMIT.....	50
Ilustración 36. Diagrama de Gantt.....	52
Ilustración 37. Costes relativos.....	54
Ilustración 38. Esquema del demostrador utilizado en el apartado I.....	57
Ilustración 39. Accionamiento Sinamics G120, y estructura de carpetas en el proyecto TIA Portal...	58
Ilustración 40. Especificación de consigna.....	59
Ilustración 41. Tipos de control/regulación.....	60
Ilustración 42. Ajustes predeterminados de consignas/fuentes de mando.....	61
Ilustración 43. Selección de parámetros importantes.....	62
Ilustración 44. Funciones de accionamiento.....	63
Ilustración 45. Panel de mando de la puesta en servicio del accionamiento.....	65
Ilustración 46. Esquema del demostrador utilizado en el apartado II.....	67
Ilustración 47. PLC y accionamiento conectados mediante PROFINET IO.....	68
Ilustración 48. Estructura de carpetas del PLC, con un objeto tecnológico de tipo “TO_PositioningAxis”.....	68
Ilustración 49. Panel de mando del OT en modo “Establecer punto de referencia”.....	69
Ilustración 50. Panel de mando del OT en modo “Establecer punto de referencia”.....	70
Ilustración 51. Panel de mando del objeto tecnológico en Modo Jog.....	70
Ilustración 52. Panel de mando del OT en modo “Consigna de velocidad de giro”.....	71
Ilustración 53. Panel de mando del OT en modo “Posicionamiento relativo”.....	71
Ilustración 54. Panel de mando del OT en modo “Posicionamiento absoluto”.....	72
Ilustración 55. Esquema del demostrador utilizado en el apartado 4.3.....	73

## 1. RESUMEN TRILINGÜE

---

**Resumen:** En este trabajo se lleva a cabo la simulación mediante “Software in the Loop” (SiL), de la estación almacén de la célula de montaje FMS-200.

Las simulaciones forman parte del ámbito de la Industria 4.0, y son cada vez mas corrientes en todas las industrias, por el importante ahorro de costes que permiten. En este proyecto se analizarán las oportunidades que presenta su uso, sus ventajas e inconvenientes, y se explicará el desarrollo de un ejemplo.

Se ha decidido utilizar la estación almacén de la célula de montaje FMS-200 como demostrador de esta tecnología, y se detallarán los pasos a seguir para lograr un buen gemelo digital de la misma.

**Abstract:** The purpose of this work is the development of a Software in the Loop (SiL) simulation of the automatic warehouse station of the FMS-200 assembling cell.

Simulations are part of the Industry 4.0, and are increasingly common throughout all the industries, due to the significant cut they can bring to the costs. In this project, simulations’ strengths and weaknesses, and the opportunities they provide will be analyzed, and the development of an example demonstrator will be explained.

As demonstrator of this technology, the warehouse station of the FMS-200 assembling cell has been chosen, and detailed explanation of the steps towards a good digital twin will be given.

**Laburpena:** Lan honetan FMS-200 muntaia-zelularen biltegi estazioaren “Software in the Loop” (SiL) simulazioa egiten da.

Simulazioak, 4.0 Industriaren esparruan aurki dezakegu eta gero eta gehiago erabiltzen dira industriaren arlo guztietan, kostu aurrezpen handia ahalbideratzen dutelako. Proiektu honetan simulazioaren aukerak, abantailak eta eragozpenak aztertzen dira, eta adibide baten garapena azaltzen da.

FMS-200 muntaia-zelularen biltegi estazioa erabiltzen da teknologia hau adierazteko eta kide digital on bat lortzeko urratsak zehazten dira.

## 2. INTRODUCCIÓN

---

El presente trabajo, tiene como objetivo desarrollar un gemelo digital de una estación de la célula FMS-200; en concreto, la estación almacén. Esta célula está compuesta por cinco estaciones, que realizan un montaje siguiendo seis modelos diferentes. La función de la estación almacén dentro de la célula es identificar el modelo de montaje que recibe de las primeras tres estaciones, y almacenarlo en una fila concreta para cada modelo. Para ello consta de dos ejes cartesianos (X e Y) servocontrolados que cubren el área del almacén, y un cilindro neumático que permite el movimiento entre dos posiciones en el eje vertical (eje Z).

En primer lugar se presentan el contexto y los antecedentes de este trabajo, así como los objetivos que se pretenden cumplir, y el alcance del mismo. Posteriormente se detallarán los beneficios que se esperan lograr. También se incluirá un análisis del estado del arte, para dar a conocer al lector todas las herramientas utilizadas en el desarrollo de la simulación, y se analizarán posibles alternativas y riesgos.

Ya en la parte técnica se procederá a una explicación detallada de los pasos seguidos para lograr el desarrollo de esta simulación, explicando las tareas que es necesario desarrollar en cada uno de los programas empleados.

Después se hará un análisis de la metodología, incluyendo un diagrama de Gantt, para aportar perspectiva al tiempo empleado en la planificación y el desarrollo. También se incluirá un descargo de gastos, en el que se detallarán los costes asociados al desarrollo del proyecto.

Por último, se presentarán unas conclusiones, extraídas del análisis de todo lo previamente expuesto. Se incluye además un anexo con parte de las pruebas desarrolladas para lograr la consecución del proyecto.

### 3. CONTEXTO Y ANTECEDENTES

---

Desde la primera revolución industrial hasta nuestros días, la única forma de verificar el correcto funcionamiento de una máquina ha sido la realización de pruebas con ella misma. La introducción de nuevas máquinas en las líneas de producción ha conllevado largas paradas de la línea completa, normalmente de varios días, o incluso semanas hasta asegurar su correcto funcionamiento; la adquisición de maquinaria de nuevo diseño no se ha realizado sin que antes técnicos de la empresa compradora la examinen; y la programación no se ha validado sin probarla anteriormente en la máquina real.

Todas estas actividades han llevado siempre aparejadas importantes costes económicos y de recursos, así como grandes pérdidas de beneficios ocasionadas por las interrupciones en el funcionamiento normal de la empresa y el uso de grandes cantidades de recursos en tareas no productivas. Por esta razón, la industria siempre ha buscado formas de eliminar estos costes, o reducirlos lo máximo posible.

El uso de simulaciones proporciona una respuesta a estos problemas, permitiendo por primera vez prescindir de la máquina real, y realizar las pruebas sobre un modelo previamente programado para acercar su comportamiento a ella en todos los aspectos posibles, de la forma más fiable. Actualmente las simulaciones permiten comprobar el funcionamiento de estaciones concretas, líneas de producción, o incluso fábricas enteras. Esta tecnología permite reducir los tiempos no productivos y reducir los recursos dedicados a las pruebas, con el consiguiente ahorro económico.

El desarrollo de herramientas de simulación cada vez más precisas permite realizar una creciente cantidad de pruebas sobre un modelo simulado antes, incluso, de la adquisición de la máquina. En la actualidad se están desarrollando modelos con precisión suficiente como para realizar sobre ellos pruebas de validación de los programas que controlarán la máquina real. Su uso no se limita a reemplazar a las máquinas reales cuando se necesita comprobar su funcionamiento, sino que también se utilizan para entrenar sistemas de control basados en la inteligencia artificial, la concepción y el diseño de nuevas máquinas, o el mantenimiento predictivo de cualquier tipo de elemento.

El uso de simulaciones forma una parte central de la cuarta revolución industrial, conocida como Industria 4.0 [1], que aspira a cambiar de forma significativa los modelos de producción existentes, para hacerlos mas flexibles y capaces de reaccionar con rapidez frente a una demanda cambiante, y que demanda altos grados de personalización.

Con el objetivo de tomar parte en el desarrollo de estas tecnologías, el curso 2017/2018 se empezó a trabajar en el departamento Ingeniería de Sistemas y Automática de la Escuela de Ingeniería de Bilbao en un proyecto con el objetivo de utilizar simulaciones para validar el sistema de control de la célula FMS-200. Este proyecto formaba parte de otro mayor, que incluía varios grupos de estudiantes y profesores, y en el que se incluía la modularización en módulos mecatrónicos de la célula y la generación automática de código, con el objetivo de diseñar un sistema que permitiera acortar sensiblemente los tiempos de parada ante una modificación de la célula. En la siguiente imagen, se observan los modelos CAD de las estaciones desarrolladas en ese proyecto.

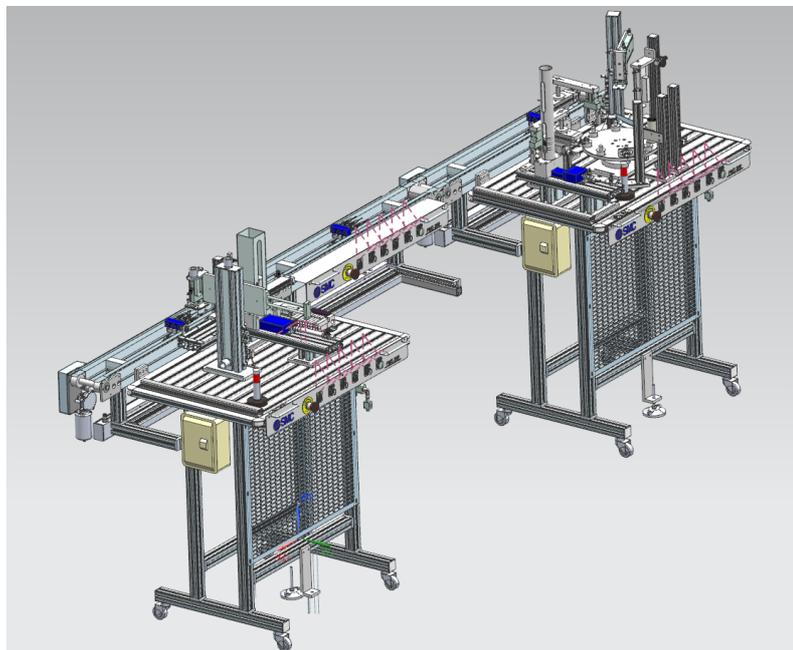


Ilustración 1. Modelos desarrollados el curso 2017/2018

El proyecto que aquí se presenta es continuación de aquel, que no se pudo llevar a cabo de forma completa en un solo año debido, entre otras cosas, a la dificultad de simular los ejes servocontrolados de la estación almacén.

## 4. OBJETIVOS Y ALCANCE

El objetivo de este proyecto es realizar una simulación completa de la estación almacén de la célula FMS-200, que sea lo suficientemente fiable como para poder validar sobre ella la programación que posteriormente se use en la estación real. Esto es lo que se conoce como gemelo digital. Para ello, se efectuará la simulación mediante “Software in the Loop” (SiL), que implica también la simulación del autómatas empleado como controlador, de forma que todo el proceso se lleve a cabo en el mismo equipo, como se aprecia en la ilustración 2. Se trata de lograr que la estación simulada se comporte de igual forma que la real, y de que la programación pueda ser utilizada en ésta de forma segura sin alteraciones tras ser validada en la simulación.

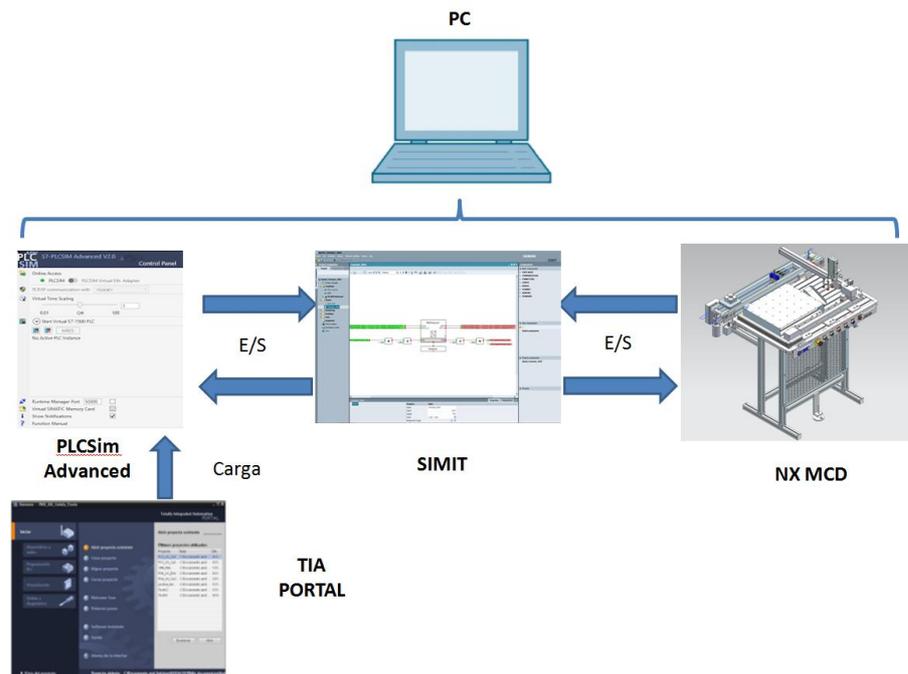


Ilustración 2. Esquema de la conexión empleada para este proyecto

Para realizar esta simulación, se parte de las bases del trabajo previamente mencionado, realizado el curso 2017/2018. Por ello, se cuenta ya con un modelo CAD de la estación realizado en el paquete de software CAD/CAM/CAE NX de Siemens, proporcionado por el fabricante de la célula. A este modelo se le deben añadir sensores y actuadores para que pueda observarse en él la simulación.

Contando con estos elementos, se realizará en primer lugar la simulación de los dos ejes servocontrolados mediante el uso de los objetos tecnológicos (OT), programables en la herramienta TIA Portal [2]. Estos elementos son capaces de realizar un control en posición de un eje, ya sea real o simulado. Para llevar a cabo este sistema de control, se deben sustituir los servos de los que consta la estación original por variadores de frecuencia SINAMICS, que recibirán instrucciones desde el PLC.

Estos variadores también son simulables, por lo que con ello se salva el principal problema que se había encontrado en intentos previos de simular esta estación, que era la dificultad para simular los servos. Sin embargo, la estación real disponible en el laboratorio no dispone de esta tecnología, por lo que la programación desarrollada no se podrá usar en dicha estación en su configuración actual. A pesar de ello, con este programa si sería posible controlar una estación real que dispusiera de la configuración adecuada, por lo que la simulación sigue cumpliendo su cometido de validar el código empleado.

Posteriormente al desarrollo del programa de control y de los objetos tecnológicos, se procederá a la conexión del PLC simulado con el modelo en NX-MCD, mediante la herramienta SIMIT. Esta herramienta también tiene la función de simular el variador de frecuencia SINAMICS, y se puede utilizar para monitorizar la simulación.

## 5. BENEFICIOS APORTADOS POR EL PROYECTO

---

Tratándose el diseño de simulaciones de un campo en auge, y sujeto a grandes innovaciones cada poco tiempo, resulta indudablemente beneficioso adquirir conocimientos que además puedan servir de base para futuros trabajos. Dada la implantación creciente de la industria 4.0, es de esperar un gran aumento en la demanda laboral de gente formada en este ámbito.

### 5.1. Beneficios económicos

La revolución de la industria 4.0 tiene como consecuencia una gran flexibilización en los modelos de producción. Siguiendo esta filosofía, las simulaciones como la realizada en este proyecto se convierten en un activo importante, pues pueden ser reutilizadas y tener varios usos posteriores al originario. De esta manera, el tiempo invertido en el desarrollo de la simulación se amortiza bien, ya que sobre ella se pueden realizar numerosas pruebas hasta mucho después de haber sido creadas, pudiendo extenderse su vida útil indefinidamente con pequeñas actualizaciones.

El uso de simulaciones elimina además varias de las limitaciones que tiene el uso de modelos reales para la realización de pruebas. En el caso de un modelo digital, los daños o la destrucción debido a las pruebas realizadas se convierten en irrelevantes, por lo que se pueden probar fallos sin incurrir en grandes costes. Como ejemplo, en la imagen se aprecia la prueba destructiva de un motor aeronáutico, con un coste unitario de 25 millones de euros aprox. [3]. El uso de simulaciones permite disminuir la cantidad necesaria de estas pruebas hasta reducirlas a una o dos como mucho.



Ilustración 3. Prueba destructiva del motor aeronáutico General Electric GE90

En el caso concreto de la célula FMS 200, la disponibilidad de una simulación también aporta beneficios. Cualquier alumno, profesor o investigador que desee reprogramar la célula podrá probar sobre la simulación su programación, sin riesgo de dañar ninguna estación real. La simulación es, además, fácil de adaptar, por lo que si se desean hacer cambios en algún sistema físico, como un cilindro neumático, se pueden hacer pruebas previamente con la simulación para comprobar su viabilidad, antes de realizar ninguna adquisición.

## 5.2. Beneficios de seguridad

Además del beneficio económico, la posibilidad de reutilizar el modelo y el nulo impacto de los fallos también implica que se pueden realizar más pruebas sin apenas incurrir en gastos adicionales, lo que puede implicar una mayor seguridad del producto final en comparación con el uso de modelos reales. Esto además, permite el entrenamiento automático de inteligencias artificiales utilizadas en sistemas avanzados de control, que en numerosos casos ofrecen grandes ventajas respecto a los sistemas clásicos [4].

## 6. ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE

---

### 6.1. Célula FMS 200:

Esta célula es un sistema modular diseñado con fines didácticos [5]. El diseño original de SMC cuenta con hasta 10 estaciones que permiten varias combinaciones entre ellas, desarrollando una gran variedad de conjuntos. La célula disponible en el laboratorio desarrolla un montaje consistente en un pallet, una pieza base, un eje, un rodamiento y una tapa, y consta de 5 estaciones:

1. Alimentación de la base (FMS 201)
2. Estación robot (FMS 202 y 204)
3. Inserción de la tapa (FMS 205)
4. Almacén automático (FMS 208)
5. Estación de retorno



Ilustración 4. Célula FMS 200 del laboratorio de automática

Los pallets disponen de un código binario consistente en tres agujeros que pueden tener insertado un tornillo o no. Las estaciones disponen de un sistema para leer esos códigos, y realizan diferentes montajes dependiendo de cual de ellos sea.

### Estación almacén (FMS 208):

Después de que las estaciones 1, 2 y 3 realicen el montaje completo, la estación almacén, simulada en este proyecto, tiene como función retirar el montaje del pallet, y almacenarlo de forma automática en uno de los puestos del almacén, que depende del código del montaje. Consiste en dos ejes servocontrolados que permiten un movimiento cartesiano, y un cilindro neumático de dos posiciones para recoger y dejar los montajes en el eje vertical. En la imagen se aprecia la estación del laboratorio de automática.



Ilustración 5. Estación almacén

## 6.2. Equipos de control:

En la realización de las pruebas se han utilizado los siguientes equipos

**Variador de frecuencia SINAMICS G120.** Los motores de los ejes se controlan con un variador de frecuencia que soporta entrada de encóder incremental para poder hacer control de velocidad y posición en lazo cerrado en el propio variador. Este variador también soporta la comunicación vía Profinet IO, como Dispositivo IO, para poder cerrar los lazos de control de velocidad y posición en un controlador superior (p.e. un PLC). Se ha decidido emplear este variador debido a que está disponible en el laboratorio, y por lo tanto se pueden realizar pruebas sobre él.



Ilustración 6. Variador de frecuencia y motor empleados en las pruebas

**Motor asíncrono trifásico.** Es un motor de 0,55 Kw de potencia, trabaja en tensiones de 400/600V, y 1.440 rpm de velocidad nominal. Se ha dispuesto un encóder incremental en el eje del motor, con niveles de tensión HTL. Este es el motor que acompaña al variador SINAMICS disponible en el laboratorio.

**Controlador PLC SIMATIC S7 1516.** Es un PLC de la gama S7 1500 de Siemens. Dispone de E/S digitales y analógicas. Soporta la comunicación vía Profinet IO como Controlador IO. Además, soporta la utilización de Objetos Tecnológicos (OTs) para el control de ejes de velocidad y ejes de posición en el propio PLC. Estos OTs están relacionados con la librería de FBs para *Motion Control*, versión V4.0, facilitada por el fabricante para este tipo de aplicaciones. Para el uso de la versión V4.0 se necesita una versión del firmware igual o superior a la V2.3. La versión de firmware del equipo es la V2.6, con la cual se pueden utilizar los OTs y los FBs de *Motion Control* de la versión V4.0. Este PLC se ha utilizado en la fase de pruebas con el variador y el motor, para comprobar el funcionamiento de los OTs en una aplicación real.



Ilustración 7. PLC SIMATIC de la gama S7 1500

### 6.3.Herramientas software:

En la realización de las pruebas se han utilizado las siguientes herramientas de ingeniería.

**TIA Portal V15.1.** Es la herramienta de ingeniería con la que se ha desarrollado el proyecto de control de la estación. En la configuración del accionamiento SINAMICS G120 se utilizará el paquete de software Startdrive V15.1, integrado en TIA Portal. También se configurarán los OTs de los ejes con las características del motor. Desde esta herramienta se realizarán validaciones manuales, actuando tanto sobre el variador directamente como sobre los OTs. Un Objeto Tecnológico es un modelo de datos del accionamiento que se ejecuta en la CPU del PLC, definido en su momento por PLCOpen y sobre el que se puede actuar desde los FBs de librería relacionados con esta tecnología.

**SIMIT V10.0.** Es una herramienta software de modelado de procesos que va a permitir realizar los modelos de los ejes para poder validar su funcionamiento en simulación. También permitirá realizar el mapeado entre la E/S del controlador en simulación y la S/E de modelo en NX-MCD. Se utilizarán modelos de la librería de SIMIT para realizar el modelo del variador de frecuencia. También se utilizará en el mapeado de E/S entre el programa de control y el modelo en NX-MCD.

**S7-PLCSIM Advanced 2.0 SP1.** Es una CPU de PLC virtual, es decir, ejecuta programas de PLC de forma virtual. Permite ejecutar programas de control en simulación, en los que el programa de control de un proceso se ejecuta en PLCSIM Advanced V2.0, contra un modelo del proceso ejecutándose en otra herramienta como SIMIT o NX-MCD. Se utilizará para realizar la simulación con *Software in the Loop* (SiL), entre el programa de control ejecutándose en esta herramienta y el modelo ejecutándose en NX-MCD.

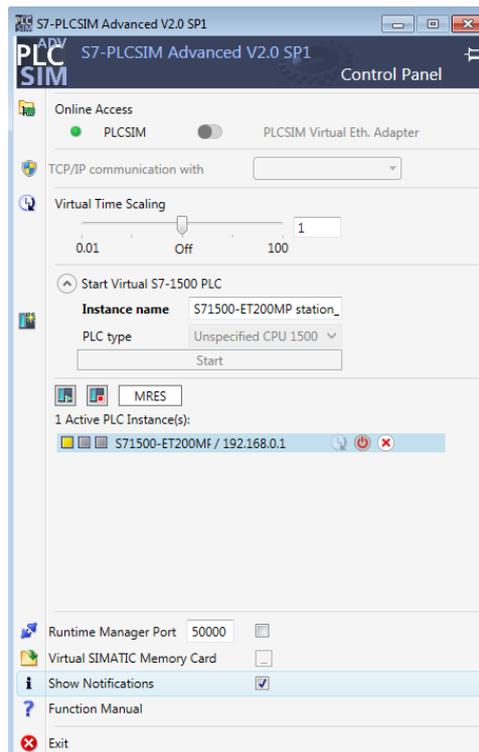


Ilustración 8. Interfaz del S7-PLCSIM Advanced 2.0 SP1

**NX-MCD V12.0.2.9.** Es una herramienta software de diseño de modelos de procesos o máquinas. Permite definir señales de E/S en el modelo y permite mapearlas con E/S del controlador. Se utilizará para realizar el modelo de la cinta transportadora sobre la que se va a validar el control del eje de velocidad. Para disponer de las funcionalidades que se utilizan en este documento se requiere una versión superior a la V12.0.1.

## 7. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS

---

La simulación propuesta en este documento se basa en un modelo de la estación desarrollado en NX-MCD, la ejecución del programa de control del PLC en una CPU virtual en PLCSim Advanced V2.0 y el modelo del variador y el mapeado de señales entre controlador y modelo, en SIMIT V10.0, todos ellos programas desarrollados por Siemens.

Existen otras opciones viables para realizar simulaciones de este tipo. Dado el creciente interés de la industria en recurrir a esta tecnología, la oferta es cada vez mas amplia y competente.

Entre los numerosos programas disponibles, destaca para la aplicación que se presenta en este proyecto el software CIROS, desarrollado por Festo. La gran ventaja de este software es que ya dispone del modelo completo de la célula FMS-200, preparado para realizar simulaciones sobre él. Mediante una conexión vía servidor OPC, se podría conectar a PLCSIM Advanced y realizar una simulación como la aquí mostrada.

Sin embargo, se ha optado por la solución aquí mostrada debido a que los programas utilizados tienen mayor importancia en el mercado, ya que CIROS es un software con fines principalmente didácticos.

## 8. ANÁLISIS DE RIESGOS

En este apartado se deben evaluar los riesgos posibles. Primero se identificarán y se clasificarán según las tablas de probabilidad y severidad, y se propondrán posibles acciones correctoras. Posteriormente se introducirán en una matriz de riesgos, que permite clasificar la importancia relativa de estos riesgos, y establecer prioridades.

Clasificación	Probabilidad
A	Extremadamente improbable. Muy escasos antecedentes
B	Remota. Pocos antecedentes
C	Ocasional
D	Común. Fallos conocidos en la mayoría de aplicaciones similares
E	Frecuente. Fallos casi inevitables

Tabla 1. Tabla de probabilidad

Clasificación	Severidad
1	Sin efectos relevantes
2	Efectos menores, sin daños materiales ni personales
3	Leve, con daños escasos
4	Crítica. Pérdida de al menos una función principal. Puede resultar mortal
5	Catastrófica. Destrucción del sistema. Puede resultar mortal

Tabla 2. Tabla de severidad

### I. Datos erróneos en el diseño

Uno de los errores mas comunes en todos los proyectos, que puede deberse a varias razones, como errores en la toma de medidas, despistes al introducir datos, o cambios no notificados en el diseño. En este caso, disponer de datos erróneos en la fase de diseño de la simulación puede llevar a realizar pruebas sobre un modelo no representativo del sistema real.

**Probabilidad:** D-Común. Este error puede darse en varias partes de la cadena de responsabilidades, y por muy diversas razones.

**Severidad:** 5-Catastrófica. Pese a que este error puede darse en un gran orden de magnitudes, tiene potencial para ser catastrófico.

**Actuación propuesta:** Se debe proceder con extremo cuidado a la hora de tomar las medidas y de comunicarlas al responsable del diseño de la simulación. Se

deberían hacer varias comprobaciones antes de dar el modelo por válido. Desgraciadamente, este error es tan común que es una de las causas de que aún sea necesario realizar algunas pruebas sobre modelos reales para garantizar la seguridad en aplicaciones especialmente delicadas.

## II. Errores en el Software

Uno de los riesgos posibles al trabajar con tantas herramientas de software diferentes, es que alguna de ellas de un error, y resulte imposible continuar con el desarrollo de la simulación mientras el fallo persista.

**Probabilidad:** C-Ocasional. Los desarrolladores de software industrial desarrollan sus productos con gran cuidado, para evitar que un número excesivo de fallos lleve a una falta de confianza en sus productos, y a un descenso en las ventas. Pese a ello, esta es una situación a la que la mayoría de la gente del sector se tiene que enfrentar en algún momento.

**Severidad:** 2-Efectos menores. La imposibilidad de continuar mientras persiste el fallo resulta en una pérdida de tiempo que puede acarrear consecuencias económicas. Sin embargo, en muy escasas ocasiones resulta una amenaza para el proyecto, y se suele solventar en unos pocos días.

**Acciones propuestas:** En el caso de que no se pueda solventar el problema con recursos propios, lo mejor es contactar con el desarrollador o el suministrador del producto.

## III. Exceso de confianza en la simulación

Pese a la constante mejora de los programas de simulación, los modelos nunca pueden simular por completo todas las dinámicas de la máquina real. En ocasiones es necesario utilizar varios modelos diferentes para hacer distintas pruebas en distintos programas, ya que hoy en día no es posible desarrollar modelos que sirvan para todo al mismo tiempo. Un exceso de confianza puede llevar a fallos posteriores de difícil remedio.

**Probabilidad:** B-Remota. Cualquier profesional formado es consciente de que las simulaciones son una potente herramienta, pero tampoco son una solución para todo. Además, la reciente incorporación de esta tecnología hace que aún se vea con más desconfianza que aceptación acrítica.

**Severidad:** 4-Crítica. Aun las mejores simulaciones están lejos de la perfección, y en aplicaciones que trabajan con márgenes de seguridad muy escasos la confianza excesiva en ellas puede llevar a fallos graves.

**Acciones propuestas:** Es necesario que la persona o el equipo responsable de realizar las pruebas sobre una simulación tenga claro para que y para que no puede utilizarse, y debe ser consciente de sus limitaciones. Pese a resultar mas caro, en ocasiones es necesario realizar varias simulaciones distintas para probar aspectos diferentes de una máquina. En aplicaciones especialmente delicadas o que no puedan trabajar con amplios márgenes de seguridad, será necesario realizar alguna prueba sobre el modelo real.

#### IV. Pérdida de datos

Al igual que otros programas informáticos, una simulación está expuesta a ser corrompida, perdida, borrada por descuido, o algún otro problema que cause su pérdida. En caso de no poderse recuperar, sería necesario realizar una nueva.

**Probabilidad:** C-Ocasional. La pérdida de archivos informáticos es conocida por cualquier persona que trabaje con ellos.

**Severidad:** 3-Leve. Perder una simulación puede ocasionar pérdidas de tiempo y económicas equivalentes a los recursos que haya costado hacerla. Sin embargo, ningún proyecto correctamente planificado se verá amenazado por ello.

**Acciones propuestas:** Es necesario contar siempre con copias de seguridad actualizadas, para que la pérdida de un archivo no sea irreversible.

#### V. Defectos ocultos en la máquina real

Es posible que la máquina proporcionada tenga defectos de fabricación que causen que su comportamiento no se corresponda con el de la simulación, que solo puede ser diseñada sobre el funcionamiento teórico de la máquina. En este caso las pruebas sobre la simulación pueden no detectar fallos potenciales, o puede que las pruebas no resulten del todo representativas.

**Probabilidad:** A-Extremadamente improbable. Resulta muy difícil que con técnicas modernas de fabricación la realidad se aleje del diseño tan significativamente como para suponer un problema.

**Severidad:** 4-Crítica. Dependiendo de la severidad del defecto, puede que ocurra un fallo no detectado por la simulación que ponga en peligro la integridad de la máquina.

**Acciones propuestas:** Resulta imposible detectar fallos de este tipo con una simulación, aunque se pueden tratar de prever escenarios adversos. Para aplicaciones de cierta responsabilidad será necesario hacer pruebas con el modelo real.

### 8.1. Matriz de riesgos

La matriz de riesgos tiene como función poner en perspectiva los posibles problemas descritos anteriormente. Según su puntuación en los dos aspectos analizados, se situarán mas lejos o mas cerca del vértice inferior derecho, que señala los peligros con mayor riesgo asociado. Con ello se puede establecer la prioridad con la que deben ser tratados.

\Severidad Probabilidad\ A	1	2	3	4	5
B	Bajo	Bajo	Moderado	Alto III	Inaceptable
C	Bajo	Bajo II	Moderado IV	Alto	Inaceptable
D	Bajo	Moderado	Alto	Inaceptable	Inaceptable I
E	Moderado	Alto	Inaceptable	Inaceptable	Inaceptable

Tabla 3. Matriz de riesgos

## 9. DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA

En este proyecto, se trata de realizar un control en posición del modelo de la estación almacén de la célula FMS 200 en NX MCD haciendo uso del Objeto Tecnológico “*TO\_PositioningAxis*” de Motion Control en TIA Portal. El programa desarrollado en TIA Portal se cargará y se ejecutará en la CPU virtual PLCSim Advanced V2.0. Para el intercambio de información entre NX-MCD y PLCSim Advanced V2.0 se hace uso de la herramienta SIMIT, cuyo objetivo es mapear E/S de ambos programas [6]. Con esto se consigue realizar una simulación “Software in the Loop” [7], realizada en su totalidad en un único equipo, y obtener un gemelo digital de la estación.

A modo de resumen y comparando el proceso real y el proceso virtual, se pueden realizar los siguientes comentarios:

En el proceso real se dispone de un controlador (PLC) en el que se ejecuta el programa de control. Un accionamiento (variador de frecuencia), se comunica vía PROFIdrive con el PLC, y actúa sobre el motor que mueve el eje correspondiente.

En el proceso virtual se dispone de una CPU de PLC virtual (PLCSim Advanced V2.0) en el que se ejecuta el programa de control; un modelo del accionamiento (variador de frecuencia) en SIMIT, que se comunica con el PLC virtual (PLCSim Advanced V2.0), y un modelo del proceso (estación almacén) desarrollado en NX-MCD, el cual intercambia la información de E/S con el modelo del variador en SIMIT.

Para comunicar el PLC virtual con SIMIT se empleará uno de los telegramas estándar de PROFIdrive. PROFIdrive define varios tipos de telegramas para el intercambio de información entre los Controladores IO y los Dispositivos IO en Profinet. Para esta aplicación, se utilizará el telegrama 3, que permite realizar un control de posición. Consta de 5 palabras en el sentido de envío del PLC al variador de frecuencia y de 9 palabras de respuesta en el sentido del variador de frecuencia al PLC

La siguiente tabla muestra la estructura del telegrama 3.

	PZD 1	PZD 2-3	PZD 4	PZD 5	PZD 6-7	PZD 8-9
TEL_3 Nominal (Envío)	STW 1	NSOLL_B	STW 2	G1_STW		
TEL_3 Real (Respuesta)	ZSW 1	NIST_B	ZSW 2	G1_ZSW	G1_XIST 1	G1_XIST 2

Tabla 4. Telegrama 3 de PROFIdrive

En la siguiente tabla se describe el significado de cada palabra.

NOMINAL		REAL	
<b>STW</b>	Palabra de control	<b>ZSW</b>	Palabra de estado
<b>NSOLL</b>	Consigna de velocidad	<b>NIST</b>	Velocidad real
<b>G1 STW</b>	Palabra de control del encóder	<b>G1 XIST1</b>	Valor cíclico del encóder
		<b>G1 XIST2</b>	Valor absoluto del encóder
		<b>G1 ZSW</b>	Palabra de estado del encóder

Tabla 5. Palabras del telegrama 3

A continuación se detallarán los pasos que se han seguido en el desarrollo de la simulación, por cada uno de los programas utilizados.

### 9.1.PROYECTO TIA PORTAL. DISEÑO

El proyecto TIA Portal se debe desarrollar tal y como se haría con un proyecto para una estación real. Se diferencia la fase de diseño, en la que se configurarán los objetos tecnológicos y el hardware, de la del desarrollo de la aplicación. Con respecto a esta programación, el aspecto mas relevante es la introducción de Objetos Tecnológicos, que reemplazarán a los servos empleados en la estación del laboratorio.

Comenzando con el hardware, se inserta el PLC en el proyecto TIA Portal con su correspondiente hardware y software, se le asigna una dirección IP, p.e. 192.168.0.152. Para insertar el accionamiento en el proyecto se debe insertar desde la vista “Vista de redes”, “Catálogo HW”, “Otros dispositivos de campo” (se utilizará el SINAMICS G120 utilizado en las pruebas).

Una vez insertado el accionamiento, se selecciona el telegrama estándar 3 desde “Vista de dispositivos” y se inserta en el accionamiento tal y como aparece en la ilustración 9. El accionamiento así insertado no aparece en la carpetas del proyecto TIA Portal. Esta es la única forma de proceder para que SIMIT pueda importar posteriormente las palabras del telegrama 3. Se deben introducir dos accionamientos con este método, para cada uno de los ejes servocontrolados.

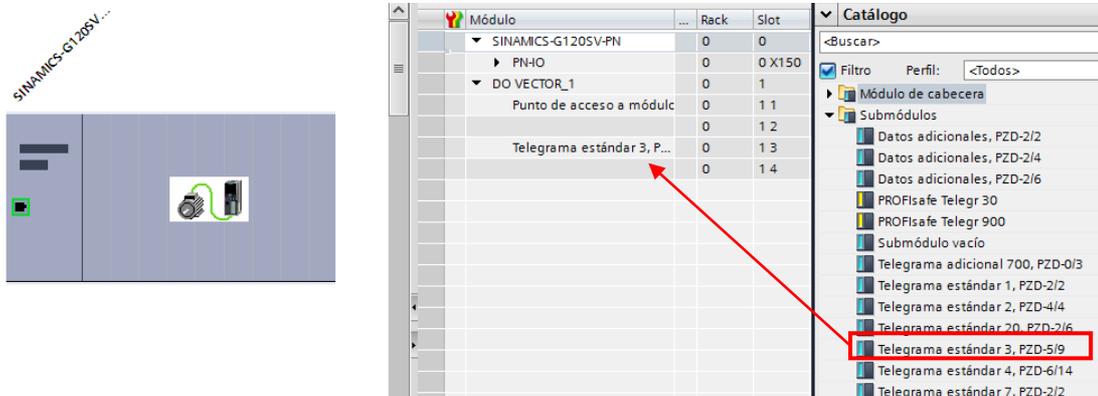


Ilustración 9. Accionamiento y telegrama 3 desde la vista de dispositivos de TIA Portal

La configuración del accionamiento depende de la forma en la que se haya introducido éste en el proyecto. Cuando se introduce desde “agregar dispositivo” se configura con la herramienta “Startdrive” instalada en el mismo TIA Portal. Cuando se añade desde “Vista de redes”, aparece como “dispositivo no agrupado” en el proyecto, como se ve en la ilustración 10, y por lo tanto no se puede parametrizar con la herramienta Startdrive, incluida en el propio TIA Portal. En este caso, si se necesita configurar un accionamiento real, se puede configurar desde el BOP (Panel básico de operador) en el propio variador de frecuencia o desde otro equipo o aplicación como “Starter”, que es una herramienta de puesta en marcha de accionamientos que se puede utilizar en un ordenador a modo de aplicación independiente.

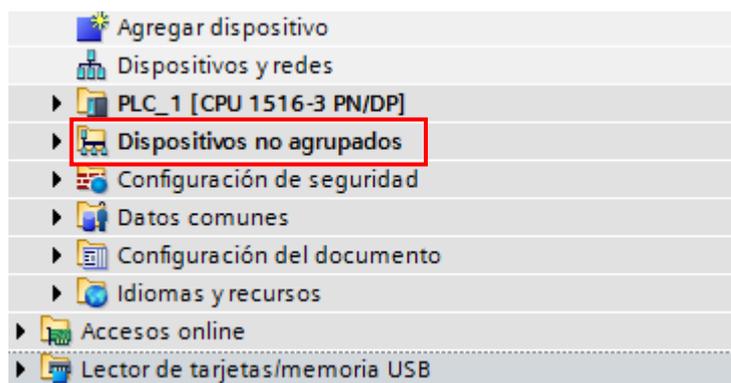


Ilustración 10. Estructura de carpetas del proyecto TIA Portal

El accionamiento será simulado por la aplicación SIMIT, por lo que no es necesaria su configuración. Ésta se utiliza para configurar los parámetros dinámicos y eléctricos del accionamiento, que no son necesarios en simulación. Con esto se finaliza la introducción del hardware.

A continuación se deben insertar en el proyecto TIA Portal dos Objetos Tecnológicos del tipo “*TO\_PositioningAxis*” V4.0, ya que las palabras del telegrama 3 de PROFIdrive no aparecen en la tabla de variables si se utiliza una versión inferior del OT, y por lo tanto SIMIT no podría importar dichas palabras. Posteriormente se detallará la configuración aplicada a ambos OTs. Estos OTs representarán los dos ejes servocontrolados de la estación.

30		MC_MoveAbs2_Done	Tabla de variables e..	Bool	%Q2.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
31		MC_MoveAbs2_Busy	Tabla de variables e..	Bool	%Q2.1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
32		MC_MoveAbs2_Command	Tabla de variables e..	Bool	%Q2.2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
33		MC_MoveAbs2_Error	Tabla de variables e..	Bool	%Q2.3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
34		MC_MoveAbs2_ErrorID	Tabla de variables e..	Word	%MW18	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
35		Tag_1	Tabla de variables e..	Bool	%I2.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
36		Tag_2	Tabla de variables e..	Bool	%I2.1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
37		Eje_Y_Actor_Interface_AddressI...	Tabla de variables e..	"PD_TEL3_IN"	%I38.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
38		Eje_Y_Actor_Interface_Address...	Tabla de variables e..	"PD_TEL3_OUT"	%Q22.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
39		Eje_X_Actor_Interface_AddressI...	Tabla de variables e..	"PD_TEL3_IN"	%I20.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
40		Eje_X_Actor_Interface_Address...	Tabla de variables e..	"PD_TEL3_OUT"	%Q12.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

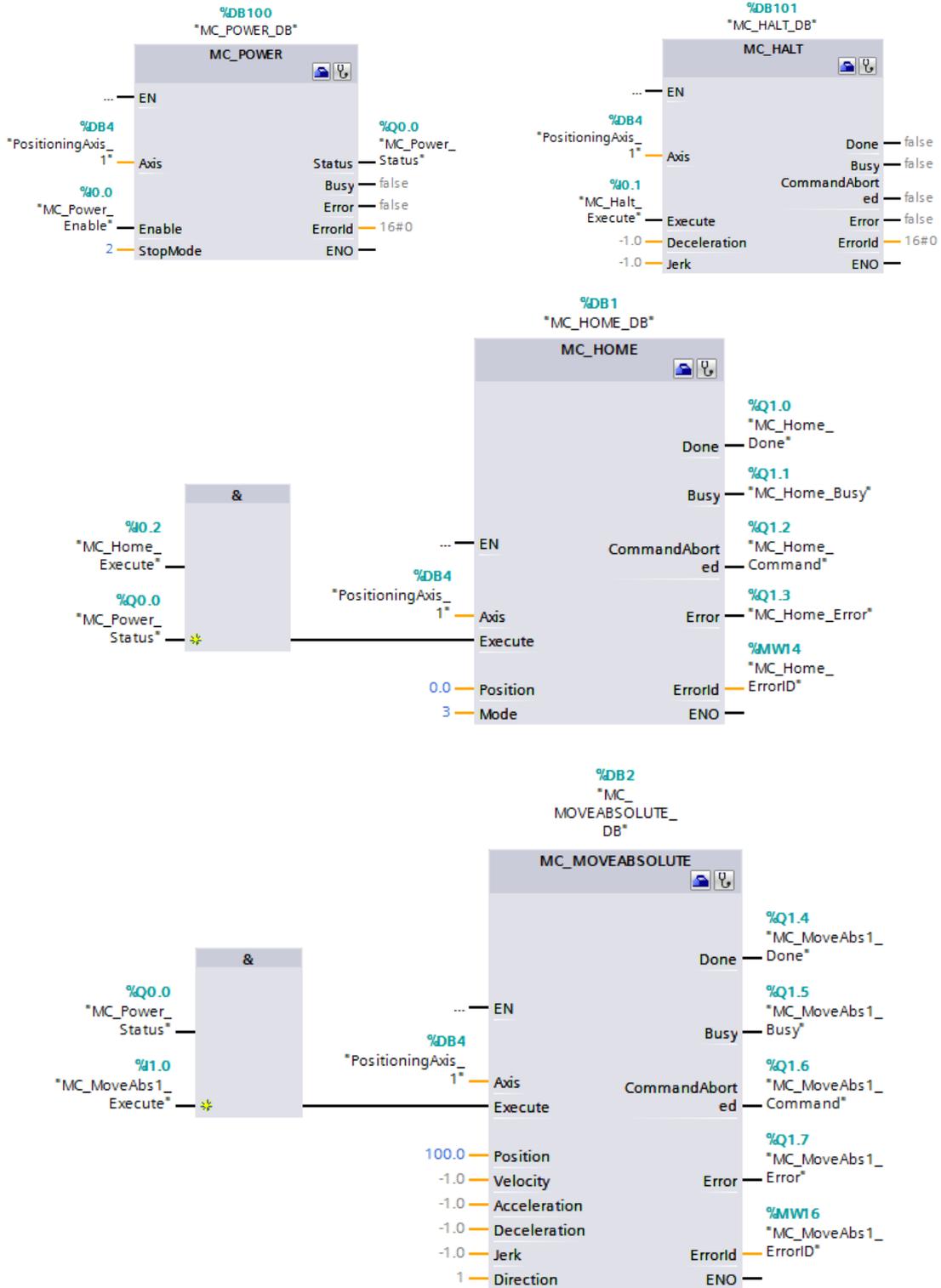
Ilustración 11. Palabras del telegrama 3 en la tabla de variables del proyecto

Cuando se agrega un Objeto Tecnológico de posición aparece en el proyecto TIA Portal un bloque de datos DB que es donde está la estructura, variables e información de estado del modelo del OT. También contiene todos los datos de configuración, consignas y valores reales, además de información de estado del OT. También aparecen los bloques de organización OB91 y OB92.

Los bloques de organización procesan los objetos tecnológicos y no se pueden modificar ya que tienen protección “know-how”. El OB91 “MC-Servo” se encarga del cálculo del regulador de posición, mientras que el OB92 “MC-Interpolator” se encarga de la evaluación de las instrucciones de Motion Control, la generación de consignas y función de vigilancia. Ambos OBs se ejecutan por interrupciones periódicas.

Para el control de los OTs, se deben añadir a la programación existente unos bloques de función (FBs), de la librería Motion Control. Para el desarrollo de la aplicación de control de posición desde la CPU del PLC, se utilizan los siguientes FBs:

- MC\_POWER: habilita y bloquea el OT.
- MC\_HALT: detiene el eje.
- MC\_HOME: referencia el objeto tecnológico.
- MC\_MOVEABSOLUTE: mueve el eje de forma absoluta.
- MC\_RESET: acusa alarmas y reinicia el objeto tecnológico.



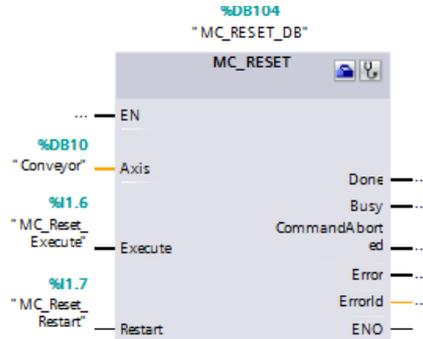


Ilustración 12. FBs de Motion Control para control de posición

Los 30 huecos del almacén estarán representados por sus coordenadas en los ejes X e Y, almacenadas en dos DB. Cuando se requiera acudir a un hueco concreto, se trasladarán las coordenadas a las entradas “Position” de los FBs MC\_MOVEABSOLUTE de los ejes X e Y. El bloque MC\_HOME estará configurado para tomar la referencia en el 0.0. Los bloques MC\_POWER, MC\_RESET y MC\_HALT se podrán activar desde el panel de mando simulado en el modelo NX-MCD, aunque el MC\_HALT también podrá ser activado automáticamente por el programa.

Dado que el objetivo es utilizar este proyecto TIA Portal en simulación, es necesario activar en TIA Portal, la opción “Permitir simulación al compilar bloques” desde el “Proyecto general”, antes de realizar la compilación del proyecto.

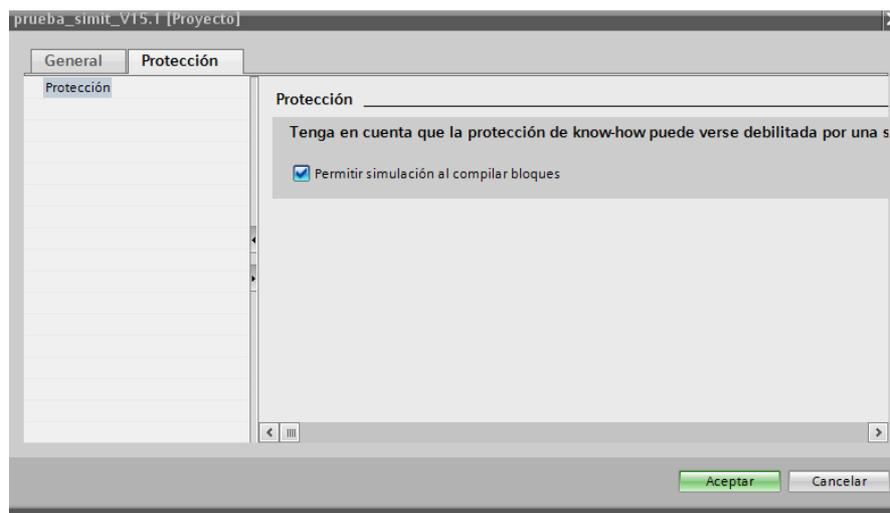


Ilustración 13. Opción de simulación del proyecto TIA Portal

Se debe asegurar que la opción “Permitir simulación al compilar bloques” este activada en el OB1, OB91 y OB92. Los OB 91 y 92 tienen protección “Know-how”. En caso de que no esté activada en dichos bloques la opción de simulación, se eliminan ambos OBs del proyecto y se compila el proyecto de nuevo. Finalizada la compilación, aparecerán de nuevo ambos OBs en el proyecto con la opción de “Permitir simulación al compilar bloques” activada.

### 9.1.1. Configuración del Objeto Tecnológico

Un Objeto Tecnológico tiene una funcionalidad genérica pero se puede parametrizar y configurar para una aplicación concreta. Esta operación se realiza desde la carpeta/pestaña “Configuración”. A continuación se comentan los parámetros más importantes de esta configuración. En ambos OTs, la configuración será igual.

#### - Parámetros básicos

En este primer apartado se especifica el tipo de eje (lineal o rotativo), se seleccionan las unidades de medida a utilizar, y se puede seleccionar la activación de la simulación que se utilizará posteriormente en la segunda forma de realizar el control.

- Accionamiento

En este apartado, se selecciona el accionamiento real, que va a tener relación con el Objeto Tecnológico. Para poder seleccionar el accionamiento (variador de frecuencia), este debe de estar previamente configurado en el proyecto TIA Portal. Existen dos formas de comunicarse entre el OT y el accionamiento, “Conexión analógica” o “PROFIdrive”. En este caso se selecciona la segunda opción dado que la comunicación con el accionamiento se realiza a través de Profinet, PROFIdrive.

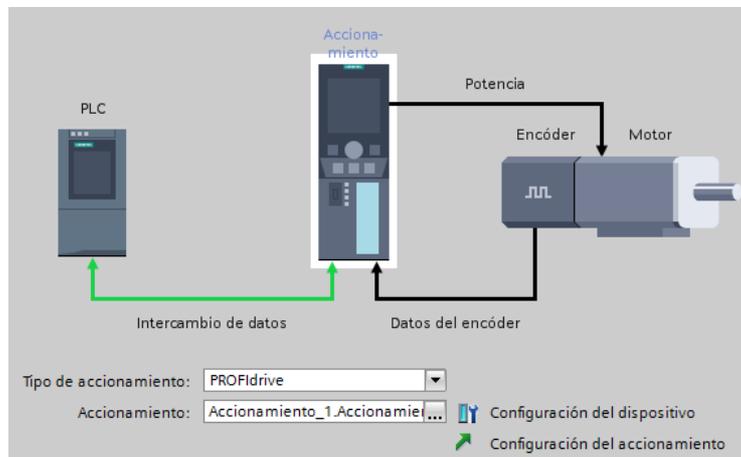


Ilustración 14. Conexión con el accionamiento

- Encóder

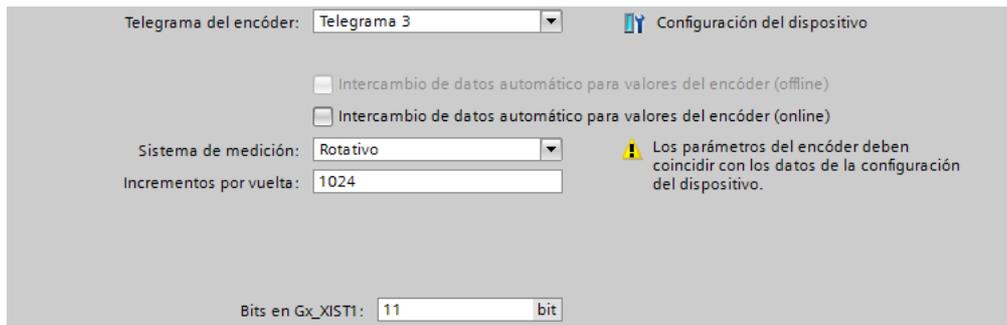
Se selecciona el encóder a utilizar, de forma análoga a la selección del accionamiento. En esta aplicación se utilizará un encóder incremental, que será simulado por SIMIT.

- Intercambio de datos con el accionamiento/encóder

En este apartado se selecciona el mismo telegrama que el seleccionado en la configuración del accionamiento, el telegrama 3, tanto en el accionamiento como en el encóder. Como velocidad de giro de referencia se introduce la nominal del motor empleado en las pruebas previas, que es de 1440 rpm, y como velocidad de giro máxima el doble de la nominal, 2880 rpm.

Ilustración 15. Intercambio de datos con el accionamiento

Se utilizará un encóder rotativo incremental con 1024 incrementos por vuelta. Se selecciona 11 bits en el apartado “Resolución fina”.



Telegrama del encóder:  Configuración del dispositivo

Intercambio de datos automático para valores del encóder (offline)
   
 Intercambio de datos automático para valores del encóder (online)

Sistema de medición:

Incrementos por vuelta:

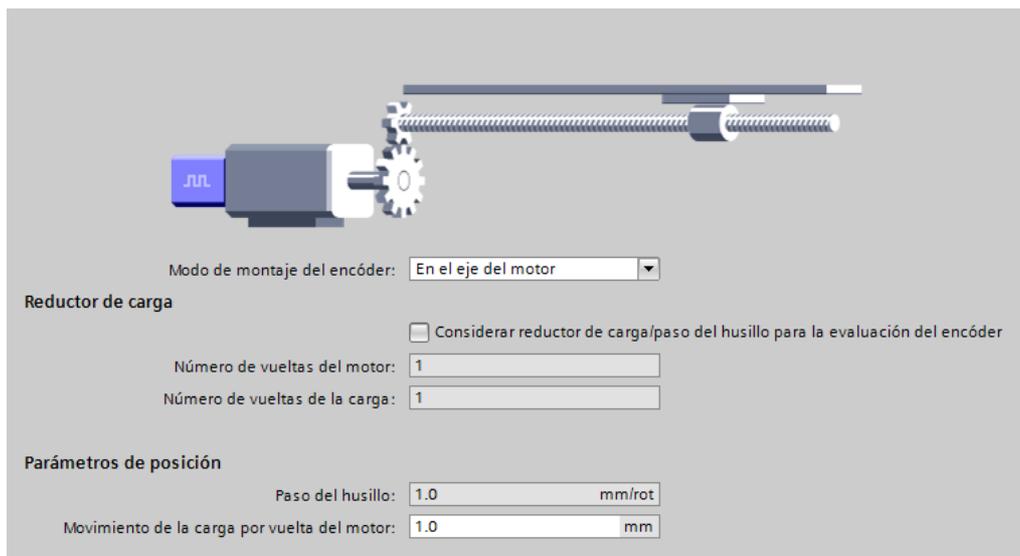
Bits en Gx\_XIST1:  bit

⚠ Los parámetros del encóder deben coincidir con los datos de la configuración del dispositivo.

Ilustración 16. Intercambio de datos con el encóder

- Parámetros avanzados

En el apartado de “Mecánica” se define una vuelta de la carga por cada vuelta del motor y un paso de husillo de 1mm/rot. En “Límites dinámicos” se introduce 46mm/s como velocidad de giro máxima, que corresponde a la velocidad nominal del motor teniendo en cuenta el paso de husillo y el reductor de carga.



Modo de montaje del encóder:

**Reductor de carga**
  
 Considerar reductor de carga/paso del husillo para la evaluación del encóder

Número de vueltas del motor:

Número de vueltas de la carga:

**Parámetros de posición**

Paso del husillo:  mm/rot

Movimiento de la carga por vuelta del motor:  mm

Ilustración 17. Parámetros avanzados/Mecánica

El resto de parámetros dinámicos como se calculan automáticamente con la opción “Calcular valores”, que toma como referencia los parámetros introducidos en los apartados de “Mecánica” y “Límites dinámicos” para ajustar los valores restantes correspondientes al “Preajuste de dinámica”, la “Parada de emergencia”, el “Referenciado” y la “vigilancia de posición”. A pesar de esta opción, sigue existiendo la posibilidad de modificar de forma manual los parámetros de estos apartados.

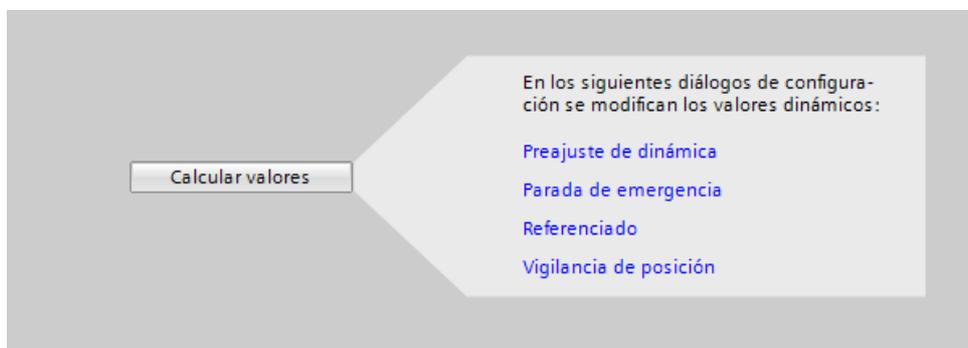


Ilustración 18. Preajuste de los parámetros avanzados

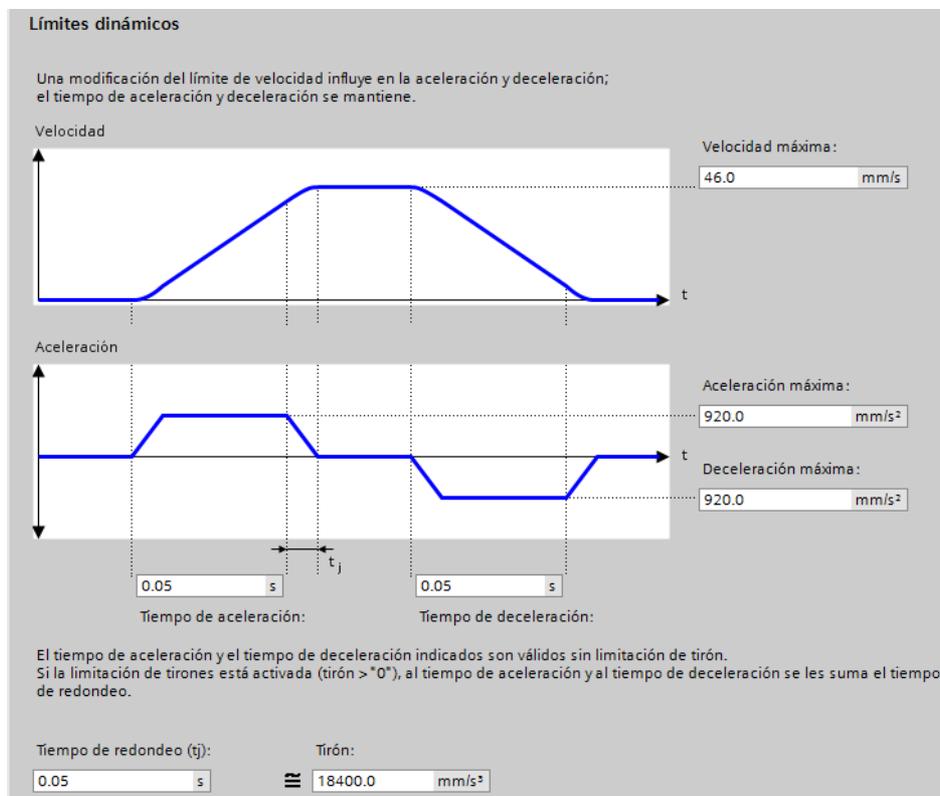


Ilustración 19. Parámetros avanzados/Límites dinámicos

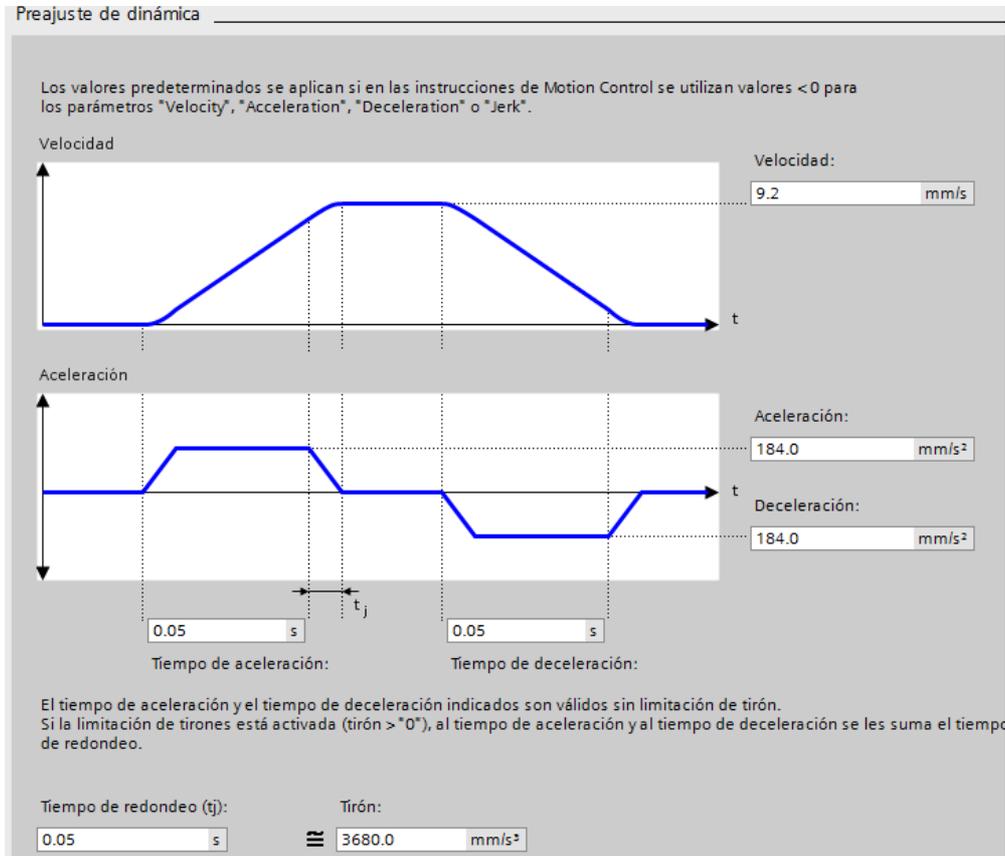


Ilustración 20. Parámetros avanzados/Preajuste de dinámica

- Referenciado

El referenciado vincula la posición del objeto tecnológico a una posición mecánica. Existen dos formas de realizar el referenciado:

**Referenciado activo:**

Se inicia el movimiento de referenciado hasta alcanzar la marca de referencia del encóder. Al reconocer la marca, la posición real del objeto tecnológico se pone al valor indicado en la instrucción "MC\_HOME". Es posible especificar un decalaje del punto de referencia, que se resta o suma automáticamente durante la búsqueda del punto de referencia.

En la pestaña “Referenciado activo” se selecciona la opción “Utilizar marca cero a través de telegrama PROFIdrive”. Con esta opción, una vez que se ha alcanzado la marca cero en el sentido de referenciado preseleccionado, la posición real del objeto tecnológico se pone a la posición de la marca de referencia.

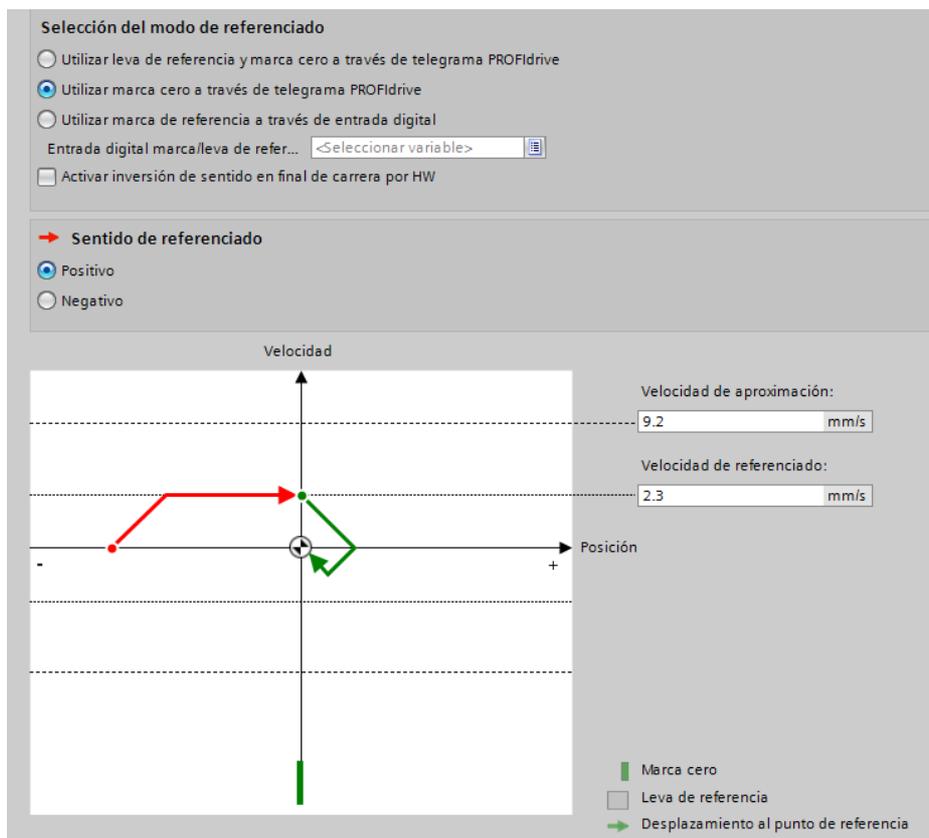


Ilustración 21. Referenciado activo

### Referenciado pasivo:

La petición de referenciado no ejecuta ningún movimiento de referenciado propio. Al reconocer la marca de referencia durante un movimiento iniciado por el usuario, la posición real se pone al valor indicado en “MC\_Home”.

En este caso también se selecciona la opción “Utilizar marca de referencia cero a través de telegrama PROFdrive” y sentido de referenciado positivo.

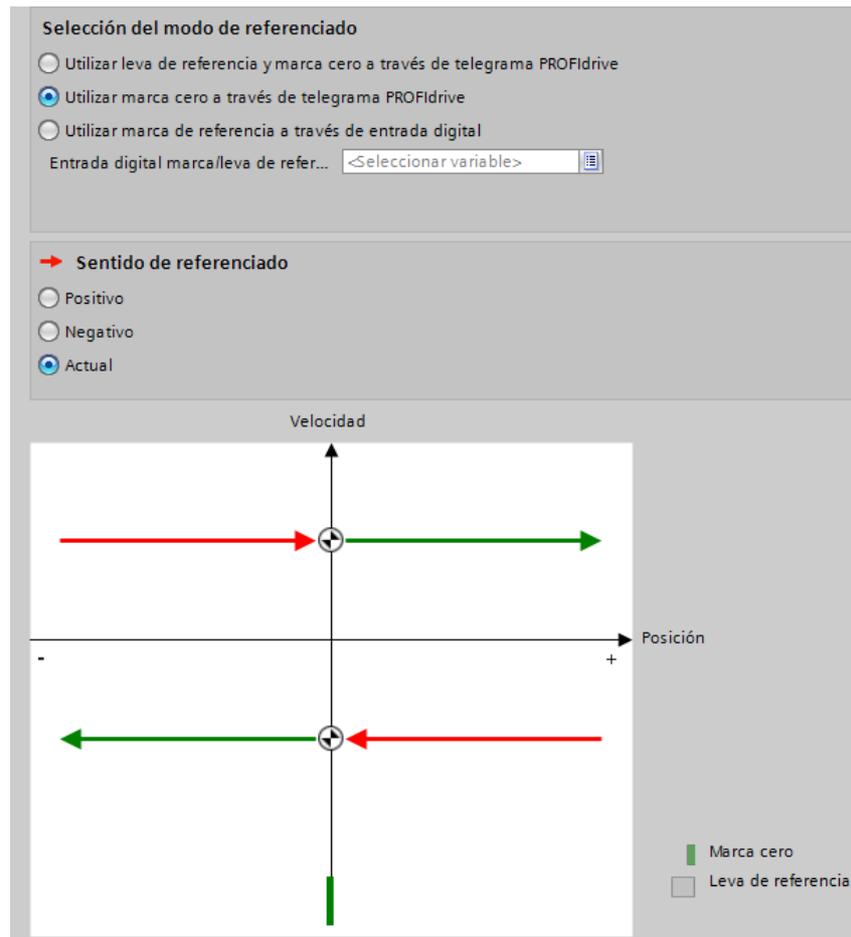


Ilustración 22. Referenciado pasivo

En la configuración del OT se deben de configurar ambas formas de referenciado, y desde el programa de usuario se selecciona el método de referenciado con el parámetro “Mode” en el FB “MC-HOME”.

- Error de seguimiento

En este apartado se desactiva la opción “Activar la vigilancia de error de seguimiento” para evitar que se bloquee el accionamiento debido a errores de seguimiento.

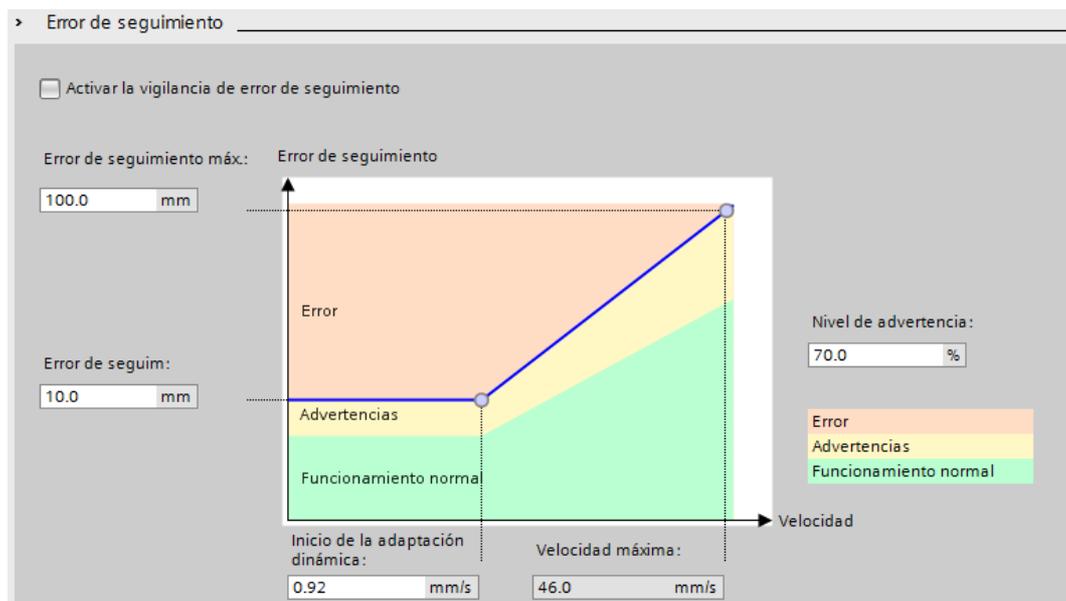


Ilustración 23. Error de seguimiento

- Vigilancia de posición:

En este apartado se establece la exactitud con la que se vigilará el posicionamiento. Tomando la referencia, se establece un margen a su alrededor, llamado “Ventana de posicionamiento”. El valor real deberá situarse dentro de este margen para considerarse que ha alcanzado la posición. También se especifica el retardo aceptable entre la llegada de la referencia a su valor estacionario y la entrada del valor real dentro de la ventana de posicionamiento (llamado tiempo de tolerancia); y el tiempo mínimo de permanencia del valor real dentro de esta ventana.

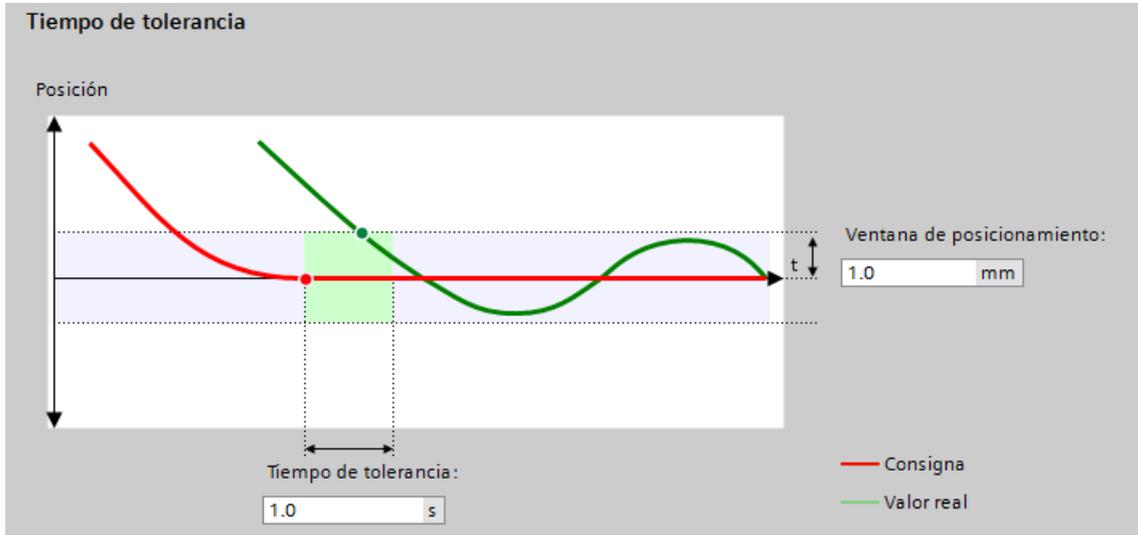


Ilustración 24. Tiempo de tolerancia

En la tabla 6 se presenta un resumen de los diversos parámetros configurables del objeto tecnológico, y las opciones seleccionadas en este caso.

Apartado	Opción seleccionada	Comentario
Tipo de accionamiento	PROFIdrive	La comunicación se realiza mediante PROFINET.
Intercambio de datos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Telegrama del accionamiento:</b> Telegrama 3</li> <li>- <b>Velocidad de giro de referencia:</b> 1440 rpm</li> <li>- <b>Velocidad de giro de máxima :</b> 2880 rpm</li> <li>- <b>Sistema de medición:</b> Rotativo</li> <li>- <b>Incrementos por vuelta:</b> 1024</li> <li>- <b>Bits en GX_X1S1T1:</b> 11</li> </ul>	Se debe seleccionar el mismo telegrama que el seleccionado en la parametrización del accionamiento.
Mecánica	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Número de vueltas del motor:</b>1</li> <li>- <b>Numero de vueltas de la carga:</b> 1</li> <li>- <b>Paso del husillo:</b> 1 mm/rot</li> </ul>	No se coloca ninguna carga en el eje del motor.
Límites dinámicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Velocidad máxima:</b> 46 mm/s</li> <li>- <b>Aceleración máxima:</b> 920 mm/s<sup>2</sup></li> <li>- <b>Deceleración máxima:</b> 920 mm/s<sup>2</sup></li> <li>- <b>Tiempo de aceleración:</b> 0.05 s</li> <li>- <b>Tiempo de deceleración:</b> 0.05 s</li> </ul>	Se introduce la velocidad de giro máxima y el resto de parámetros se calculan respecto a ésta de forma automática
Preajuste de dinámica	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Velocidad :</b>9.2 mm/s</li> <li>- <b>Aceleración:</b> 184 mm/s<sup>2</sup></li> <li>- <b>Deceleración:</b> mm/s<sup>2</sup></li> <li>- <b>Tiempo de aceleración:</b> 0.05 s</li> <li>- <b>Tiempo de deceleración:</b> 0.05s</li> </ul>	<p>Estos valores son calculados automáticamente con la opción "Preajuste de los parámetros avanzados", y se aplican cuando se introducen valores &lt;0 en las instrucciones de Motion Control.</p> <p>En este caso no se utilizan las instrucciones Motion Control, por lo que estos parámetros no tienen uso.</p>

Tabla 6. Parámetros del objeto tecnológico de posición.

## 9.2.NX-MCD

El modelo empleado en este proyecto (Ilustración 25) fue proporcionado para el proyecto de 2017/2018 junto con los correspondientes a las demás estaciones de la célula.

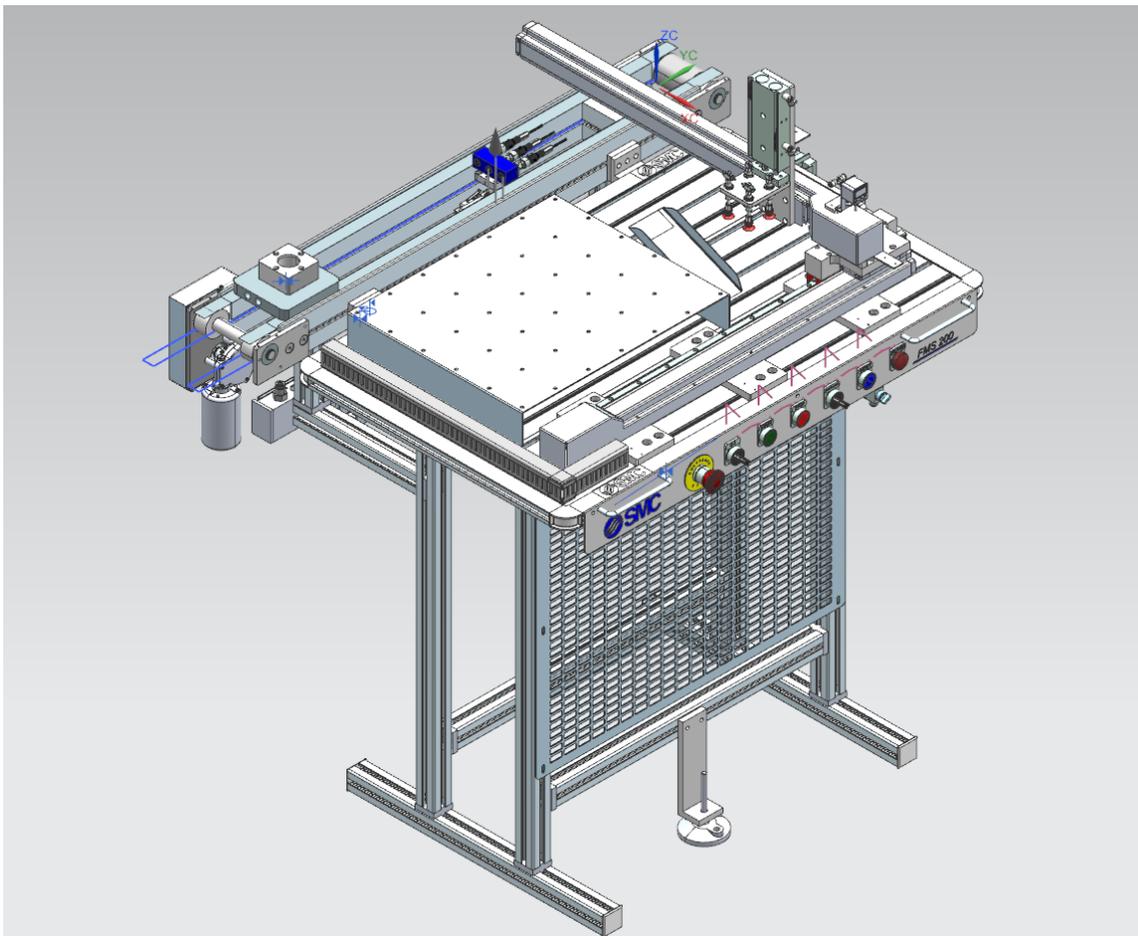


Ilustración 25. Modelo en MCD

Tomando como base el modelo en CAD, se deben emplear las funcionalidades de MCD [8] para dotarlo de físicas realistas, sensores y actuadores que permitan observar un movimiento equivalente al de la estación real en reacción a los comandos recibidos desde el PLC simulado. También se introducirán las señales que representarán las entradas y salidas del modelo.

Para realizar la conexión o mapeado de las señales desde el modelo en NX-MCD al modelo en SIMIT, se deben crear una serie de señales concretas en el modelo NX-MCD que se relacionarán con la consigna y el valor actual de velocidad y posición de los ejes.

Se deben introducir dos actuadores de tipo “Speed Control”, asignados cada uno de ellos a uno de los ejes. Estos actuadores permiten mover el carro a lo largo del eje designado, a la velocidad deseada. A la hora de configurar estos actuadores, se podrán seleccionar una velocidad, y limitaciones de fuerza y aceleración. El valor de velocidad debe quedar en cero, y para esta prueba no se introducirán límites de fuerza o aceleración. Estas opciones se seleccionarán en el caso de necesitar un comportamiento más realista.

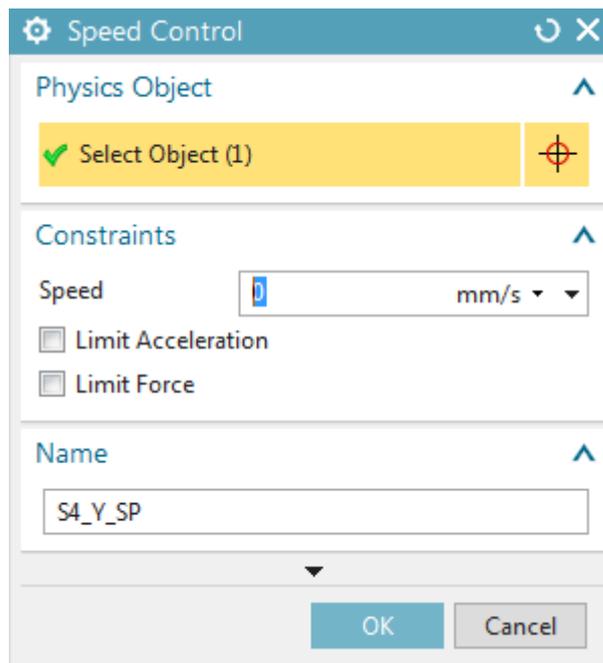


Ilustración 26. Speed Control

### 9.3. SIMIT V10.0

Como se ha comentado previamente, SIMIT necesita las variables de NX-MCD y de PLCSim Advanced V2.0 para realizar el mapeo de la información. De NX-MCD necesita todas las señales de E/S definidas en el modelo. Del PLCSim lee todas las variables declaradas en la “Tabla de variables del proyecto” en la programación TIA Portal que se le haya cargado. Por tanto, hay que realizar un mapeado de las variables de ambos programas en SIMIT. Primero se realiza el acoplamiento con PLCSim, para lo que en la carpeta “Couplings” de la estructura de carpetas de SIMIT se selecciona el acoplamiento con “PLCSIM Advanced V2.0”.

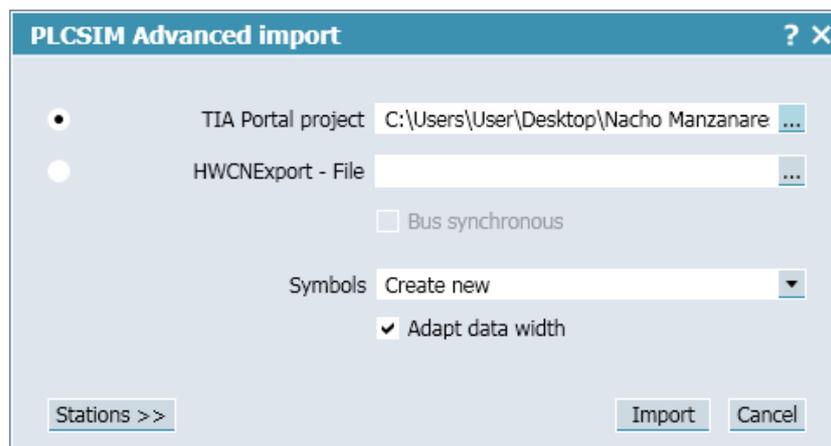


Ilustración 27. Acoplamiento con PLCSim Advanced

Se selecciona la ruta donde está el proyecto TIA Portal a importar, de este modo se importan todas las variables de la “Tabla de variables” del proyecto TIA Portal en SIMIT. Para comprobar que el acoplamiento con PLCSIM Advanced V2.0 se ha realizado correctamente, tienen que aparecer las palabras del telegrama 3.

▼ Inputs		Reset filter				
Default	Symbol name	Address ▲	Data type	System ▲	Device ▲	Modul ▲
<input type="checkbox"/>		I19.3	BOOL	0	0	4
<input type="checkbox"/>		I19.4	BOOL	0	0	4
<input type="checkbox"/>		I19.5	BOOL	0	0	4
<input type="checkbox"/>		I19.6	BOOL	0	0	4
<input type="checkbox"/>		I19.7	BOOL	0	0	4
0	Eje_X_Actor_Interface_Addre...	IW20	WORD	100	1	1
0	Eje_X_Actor_Interface_Addre...	ID22	DWORD	100	1	1
0	Eje_X_Actor_Interface_Addre...	IW26	WORD	100	1	1
0	Eje_X_Actor_Interface_Addre...	IW28	WORD	100	1	1
0	Eje_X_Actor_Interface_Addre...	ID30	DWORD	100	1	1
0	Eje_X_Actor_Interface_Addre...	ID34	DWORD	100	1	1
0	Eje_Y_Actor_Interface_Addre...	IW38	WORD	101	1	1
0	Eje_Y_Actor_Interface_Addre...	ID40	DWORD	101	1	1

Ilustración 28. Variables Input (Output del PLC) importadas en SIMIT, entre las que se encuentran las palabras de respuesta del telegrama 3.

A continuación se debe activar la opción “Play” en SIMIT, que genera una instancia “vacía” en PLCSIM Advanced V2.0. Sobre esta instancia se tiene que cargar el proyecto TIA Portal.

Una vez realizado el acoplamiento con PLCSim Advanced hay que realizar un nuevo acoplamiento, esta vez con NX-MCD. Para ello, primero hay que finalizar la simulación en SIMIT, activando STOP. El acoplamiento con NX-MCD genera una tabla de variables vacía. Para importar las variables se debe seleccionar la opción “Link to external file”, y después seleccionar el fichero \*.prt de mayor rango del modelo NX-MCD a utilizar.

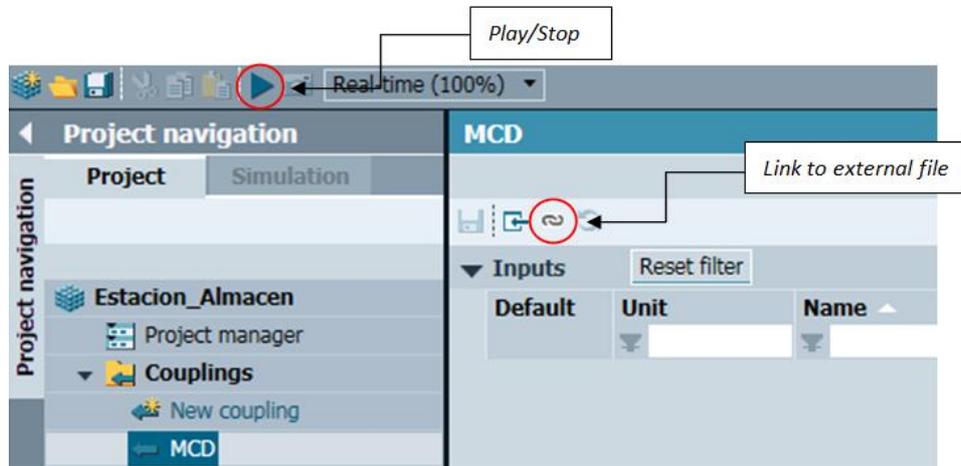


Ilustración 29. Acoplamiento con MCD

Para comprobar que el acoplamiento se ha realizado correctamente, hay que asegurarse de que en la tabla de variables en SIMIT del acoplamiento con NX-MCD aparezcan todas las variables del modelo NX-MCD.

Inputs				
Default	Unit	Name	Type	Comment
0.0	m	S4_A.SetPosition	analog	
0.0	m/sec	S4_A.SetSpeed	analog	
<input type="checkbox"/>		S4_A_mas.SetValue	binary	
<input type="checkbox"/>		S4_ALARM_2.SetValue	binary	
0.0	m	S4_Apalet_PosCtr_2.SetPosition	analog	
0.0	m/sec	S4_Apalet_PosCtr_2.SetSpeed	analog	
<input type="checkbox"/>		S4_V.SetValue	binary	
0.0	m	S4_X.SetValue	analog	
0.0	m/sec	S4_X_SP.SetSpeed	analog	
0.0	m	S4_Y.SetValue	analog	
0.0	m/sec	S4_Y_SP.SetSpeed	analog	
<input type="checkbox"/>		S4T_H_1.SetValue	binary	
<input type="checkbox"/>		S4T_M1_2.SetValue	binary	

Outputs				
Unit	Name	Type	Comment	
m	S4_A.Position	analog		
m/sec	S4_A.Speed	analog		
m	S4_A_Carcasa_Brazo2.Position	analog		
	S4_A_mas.Value	binary		
m	S4_A_Vastago_Carcasa.Position	analog		
	S4_a0.Value	binary		
	S4_a1.Value	binary		
	S4_ALARM_2.Value	binary		
m	S4_Apalet_PosCtr_2.Position	analog		
m/sec	S4_Apalet_PosCtr_2.Speed	analog		
m	S4_Apalet_vastago_S4_Apalet_carcasa_SlidingJoint(1)_1.Position	analog		
	S4_AUTO_MAN_2.Value	binary		
m	S4_Brazo2_Base.Position	analog		
	S4_CODIGO_PALET.Value	integer		
m	S4_EMERGENCY_SlidingJoint(1)_2.Position	analog		
	S4_EMERGENCY_STOP_1.Value	binary		
radians	S4_Presencia_Palet_S4_Base_Presencia_Palet_HingeJoint(1)_1.A...	analog		
	S4_RESET_2.Value	binary		

Ilustración 30. Tabla de variables del modelo NX-MCD en SIMIT

Una vez hechos los acoplamientos se crea en SIMIT un nuevo “chart”, donde se introducen los bloques necesarios para realizar la sincronización entre TIA Portal y NX-MCD. Para este proyecto se utilizan bloques de librería “PROFIdrive2”, “Sinamics”, “Sensor” y “SensorProcessRotatory”. Se deben realizar dos construcciones con estos bloques, una por cada eje.

El bloque “PROFIdrive2” simula el accionamiento, es el bloque que se utiliza para realizar el control de posición de un eje. El bloque “Sinamics” añade funcionalidades adicionales concretas de esta gama de variadores.

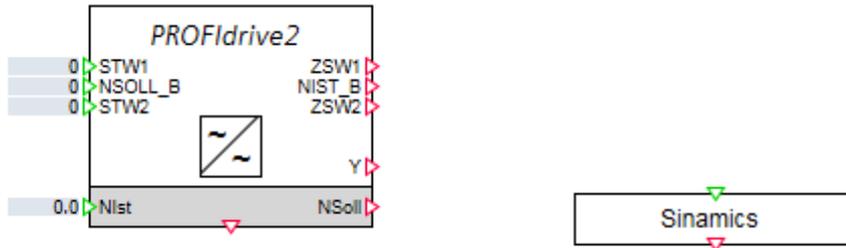


Ilustración 31. Bloques PROFdrive 2 y Sinamics

El bloque “PROFdrive2” recibe las palabras de envío del telegrama 3 “STW1”, “NSOLL\_B” y “STW2” y tiene como salidas las dos palabras de recepción del telegrama 3 “ZSW1”, “NIST\_B” y “ZSW1”. También se comunica con NX-MCD mediante las señales “NIST” (velocidad actual de la cinta) y “NSOLL” (consigna de velocidad).

Los bloques “Sensor” y “SensorProcessRotatory” se encargan de simular el encóder. El bloque “SensorProcessRotatory” tiene como entrada el valor real de posición. Este valor procede del actuador “Speed Control” de NX-MCD. Por otro lado, el bloque “Sensor” tiene como entradas las palabras “GX\_STW” (palabra de control del encóder) y como salida las palabras “GX\_ZSW” (palabra de estado del encóder), “GX\_X1ST1” (valor cíclico del encóder), y “GX\_X1ST2” (valor absoluto del encóder).

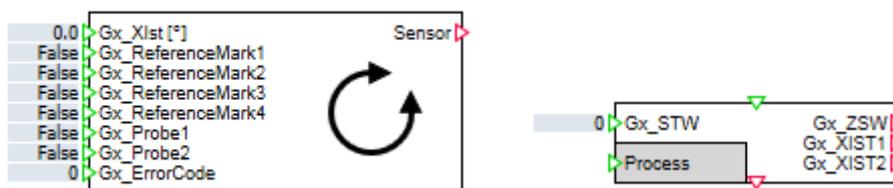


Ilustración 32. Bloques SensorProcessRotatory y Sensor.

En este caso, se ha comprobado que NX-MCD multiplica por 30000 la señal recibida, por lo que se debe incluir este factor en la entrada y la salida del bloque principal “PROFdrive2”. Incluir un factor diferente provoca un comportamiento extraño en el sistema. Además, se debe incluir una conversión a grados en la entrada del bloque “SensorProcessRotatory”, multiplicando la entrada por 360. Sin embargo, con estas conversiones no se consigue que el modelo de la cinta se mueva a la velocidad de consigna, y da numerosos errores de posicionamiento. Finalmente, tras realizar varias

pruebas con los factores de conversión se ha conseguido que el modelo se mueva conforme a la consignas y sin errores mediante una multiplicación por 36000 en la entrada del bloque “SensorProcessRotatory”.

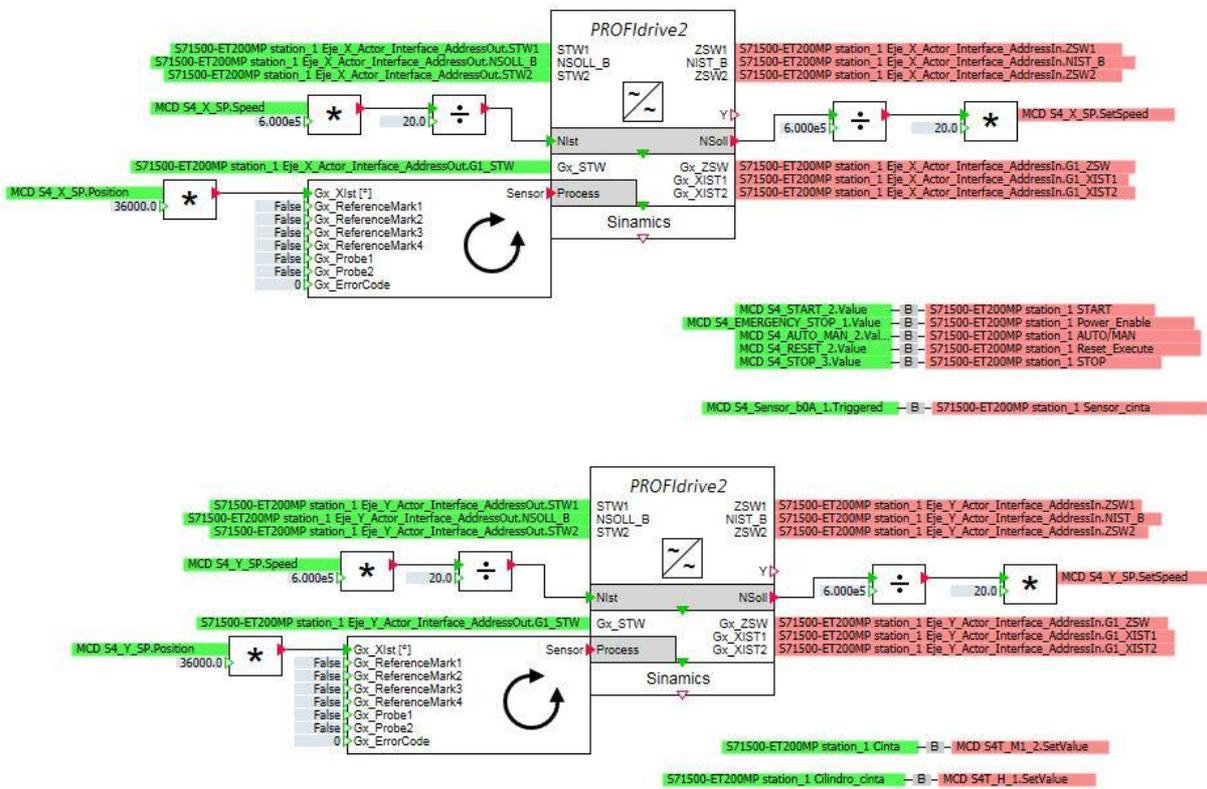


Ilustración 33. Bloques en SIMIT con las variables de NX-MCD y TIA Portal

Se debe completar la conexión incluyendo en el “chart” las entradas y salidas independientes de los OTs, que conectan NX-MCD y PLCSIM Advanced directamente. Para realizar estas conexiones se utilizará el conector “BConnector”, empleado para conectar salidas y entradas de un solo bit.

## 9.4. Proyecto TIA Portal. Aplicación

Llegado a este punto del proyecto, el gemelo digital se considera completado. Sin embargo, solo podría funcionar en modo manual. Es necesario comprobar su funcionamiento con el desarrollo de un programa de aplicación que sea homologable para una estación real.

En este caso, debido a las diferencias de diseño respecto a la realidad, con el uso de objetos tecnológicos en lugar de servos, no es posible utilizar el programa empleado por la estación del laboratorio, y es necesario desarrollar uno nuevo.

Debido a la naturaleza secuencial de la estación almacén, se ha optado por desarrollar la aplicación en S7-GRAPH. Este lenguaje de programación está basado en el estándar GRAFCET, diseñado para representar gráficamente los pasos a seguir en un sistema automatizado. Este sistema se basa en etapas y transiciones, y es especialmente útil para el diseño de sistemas secuenciales.

Como base para el desarrollo de la aplicación, se ha tomado la siguiente estructura:

0. Inicialización. Referenciado (no se repite)
1. Activación de la cinta
2. Llegada del montaje/movimiento de ejes al lugar de recogida
3. Llegada de ejes/bajada del cilindro
4. Llegada del cilindro/activación de las ventosas
5. Subida del cilindro
6. Llegada del cilindro/movimiento de ejes hasta el lugar de almacenaje
7. Llegada de ejes/bajada del cilindro
8. Llegada del cilindro/desactivación de ventosas
9. Subida del cilindro
10. Llegada del cilindro/movimiento de ejes a referencia
11. Llegada de ejes/salto a etapa 1

Como es comprensible, la programación final tiene mayor complejidad y posee un número mayor de etapas. Además incluye contadores para tomar en consideración el número de piezas. En la imagen se puede observar un detalle de la cadena desarrollada en S7-GRAPH.

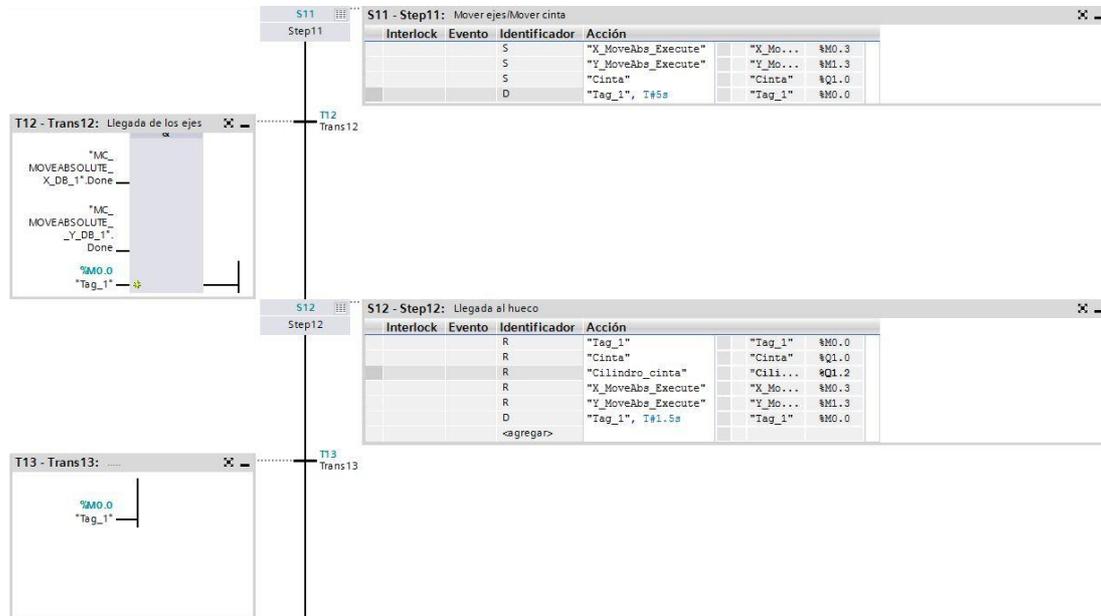


Ilustración 34. Etapas 11 y 12 de la programación, con sus transiciones

Pese a que la estación tiene la funcionalidad de diferenciar los seis montajes diferentes en columnas, no se ha implementado en la programación. Esto se debe a la falta de preparación del modelo NX-MCD para realizar esta función, y al escaso tiempo disponible para subsanar este fallo una vez se ha descubierto. Sin embargo, esta funcionalidad debería poder ser implementada sin demasiadas complicaciones en un futuro.

### 9.5.Simulación

Para activar la simulación del modelo hay que activar la opción "Play" de SIMIT, que abre automáticamente el modelo NX-MCD independientemente de si se ha abierto previamente, y también abre una instancia de PLCSIM Advanced.

En este momento ya se puede trabajar con el modelo. Si está activo, el programa de aplicación se ejecutará inmediatamente, aunque se puede trabajar en modo manual, evitando las llamadas al programa desde el OB1. Para evaluar el correcto funcionamiento del modelo se pueden crear gráficas en SIMIT en la carpeta "Monitoring" para observar tanto las señales de NX-MCD como las de TIA Portal. En la figura 43 se muestra una gráfica generada en SIMIT, con información de las señales "MCD S4\_X\_SP.SetSpeed" (consigna de velocidad al modelo) y "MCD S4\_X\_SP.SetSpeed" (velocidad real del modelo).



Ilustración 35. Tabla de monitorización de SIMIT

En este momento se puede comprobar el buen funcionamiento de la simulación. Por desgracia, se ha encontrado un error en el NX-MCD, que causa que, pese a recibir correctamente las señales correspondientes a la activación de los cilindros neumáticos, estos parecen no hacer caso a la orden y permanecen inmóviles. Esto causa que, pese a que el almacén recorre los lugares adecuados, es incapaz de recoger o dejar piezas. Se ha comprobado el modelo repetidas veces, y ejecutado de forma independiente todo funciona con normalidad, pero el modelo ejecutado a través de SIMIT no permite el movimiento de los cilindros ni siquiera de forma manual.

Una posible solución sería utilizar un tercer objeto tecnológico para controlar el movimiento del cilindro vertical. Sin embargo, esa actuación desvirtuaría la simulación, ya que la programación resultante no podría utilizarse en una estación real. Por lo tanto, se ha decidido mantener el modelo en su estado actual hasta que se encuentre alguna otra solución, debido a que el efecto del fallo es más estético que práctico, ya que se ha comprobado que las señales llegan a su destino en el momento adecuado.

## 10. METODOLOGÍA SEGUIDA EN EL DESARROLLO DEL TRABAJO

---

Este proyecto se ha desarrollado en tres fases diferenciadas:

**Fase 1:** Esta fase no pertenece intrínsecamente a este proyecto, pero se ha incluido al considerarse necesaria. En ella se efectuó el desarrollo del modelo en NX-MCD, como parte de los proyectos del curso 2017/2018. Para ello también se incluye el tiempo empleado en adquirir los conocimientos de esta herramienta.

En el comienzo del curso 2018/2019, se plantea la necesidad de encontrar un proyecto para realizar, en el que se puedan emplear los conocimientos adquiridos el curso 2017/2018. Tras una serie de propuestas, en noviembre se acuerda el planteamiento del presente proyecto, con lo que da comienzo la segunda fase.

**Fase 2:** Esta fase tiene como objetivo familiarizarse con los Objetos Tecnológicos (OTs) disponibles en TIA Portal, y comprobar su correcto funcionamiento. Se empieza con equipos reales, utilizando un variador de frecuencia SINAMICS G120 conectado a un motor asíncrono, y un PLC SIMATIC S7 1516. Posteriormente se desarrolla un demostrador empleando todo el software necesario para realizar la simulación SiL, con la finalidad de comprobar el correcto funcionamiento de todos los programas en conjunto. Para ello se ha empleado como modelo en MCD únicamente la cinta transportadora de la estación almacén.

**Fase 3:** En esta última fase se emplea el demostrador de la fase 2 como base, y se realiza la conexión del modelo completo de la estación almacén. Antes de comenzar con el desarrollo de la aplicación, se realizan una serie de pruebas manuales para ajustar la conexión. Finalmente, se desarrolla la programación completa en TIA Portal.



## 11. DESCARGO DE GASTOS

---

En este apartado se describen los costes requeridos para la realización del proyecto. Primero se ofrecerá una descripción de cada una de las partidas, para después mostrar todos los gastos en una tabla conjunta. También se incluye un diagrama para mostrar los costes relativos de cada partida.

### 11.1. Horas internas

En este apartado se incluyen los costes relacionados con el personal involucrado directamente en el trabajo. En este caso se cuenta con un alumno, al que le corresponde un rango de ingeniero junior; y un profesor, que es retribuido como ingeniero sénior. En las horas del alumno se incluye el tiempo dedicado al aprendizaje de las herramientas, el desarrollo de la aplicación y la redacción del proyecto. Al profesor se le incluyen las horas dedicadas al apoyo al alumno, reuniones, corrección y lectura de informes, y otras tareas.

### 11.2. Amortizaciones

Este apartado contiene el coste de los activos reutilizables empleados en el proyecto, de forma relativa a su tiempo de uso y a su vida útil. Estos activos no tienen por qué haber sido adquiridos expresamente para el proyecto, y pueden ser usados para otros hasta el final de su vida útil. Se incluyen aquí las varias licencias requeridas por los programas empleados, así como el ordenador utilizado para llevar a cabo las simulaciones y el variador de frecuencia y el PLC empleados en las pruebas.

### 11.3. Gastos

Se incluyen aquí los gastos empleados en activos no reutilizables para otros proyectos. En este caso se contabilizan las numerosas copias en papel de toda la documentación utilizada, así como material de oficina diverso.

### 11.4. Costes indirectos

Estos son costes no imputables a un proyecto concreto, como el gasto eléctrico, limpieza o mantenimiento de equipos. Se suele calcular como porcentaje del total de los demás gastos.

## 11.5. Costes totales

HORAS INTERNAS				
Concepto	Coste por hora	Horas totales	Total horas internas	
Ingeniero Senior (Director)	50 €	30	1.500 €	
Ingeniero Junior (Alumno)	20 €	200	4.000 €	
AMORTIZACIONES				
Concepto	Coste unitario	Vida útil (meses)	Tiempo de uso (horas)	Total amortizaciones
Siemens NX	41.000 €	24	150	355,90 €
TIA Portal	4.000 €	24	180	41,67 €
SIMIT	3.000 €	12	100	34,72 €
PLCSIM Advanced	2.000 €	36	150	11,57 €
PLC	6.000 €	60	50	6,94 €
Variador de frecuencia	700 €	60	50	0,81 €
Ordenador	1.300 €	24	200	15,05 €
GASTOS				
Concepto				Total gastos
Material de oficina				5 €
Fotocopias				20 €
<b>SUBTOTAL:</b>				5.991,67 €
Costes indirectos	10% del subtotal			599,17 €
<b>TOTAL:</b>				6.590,83 €

Tabla 7. Costes totales

## 11.6. Costes relativos

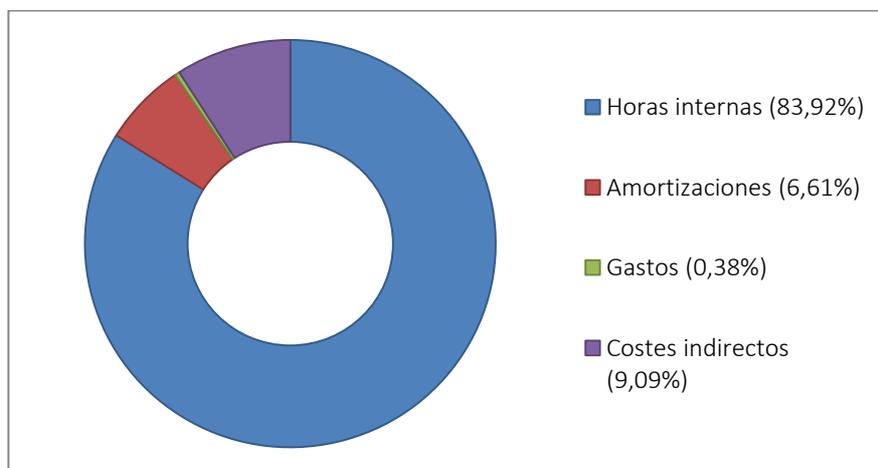


Ilustración 37. Costes relativos

## 12. CONCLUSIONES

---

La realización de este proyecto ha permitido adquirir varios conocimientos útiles, en campos de la ingeniería con mucha proyección de futuro, como el diseño de modelos físicos, la programación de sistemas de control, o la utilización de varios programas conectados para realizar una simulación “Software in the Loop”. Estas tecnologías están siendo implementadas en un número creciente de empresas, y su conocimiento puede ser de gran ayuda en un futuro laboral.

En lo respectivo a la simulación, el problema encontrado con los cilindros neumáticos del modelo ha impedido que se alcancen todos los objetivos. Sin embargo se han completado con éxito los elementos más complejos, como la simulación de los ejes de posición, y su funcionamiento está probado. Por ello, pese a que el resultado ha quedado deslucido por un fallo en el final del proceso, se puede considerar que los objetivos se han cumplido prácticamente en su totalidad.

Como tareas futuras en relación con este proyecto se espera lograr el funcionamiento correcto de la simulación. También se espera que en un futuro proyecto se logre la integración de esta estación con las restantes estaciones de la célula FMS-200, y de esa manera completar el gemelo digital de la célula completa, en el que se pueda probar cualquier programación antes de implementarla en la versión real.

## Bibliografía

---

- [1] Disruptive Angels, «¿Qué es la Industria 4.0?,» [En línea]. Available: <https://web.archive.org/web/20170811060206/https://blog.disruptiveangels.com/industria-4-0/>.
- [2] SIEMENS, «SIMATICS S7-1500 Motion Control V13 Function Manual,» 2014.
- [3] GE Aviation, «Record Year For The World's Largest, Most Powerful Jet Engine,» [En línea]. Available: <https://www.geaviation.com/press-release/ge90-engine-family/record-year-worlds-largest-most-powerful-jet-engine>.
- [4] S. Lanka, «Deep Deterministic Policy Gradient,» [En línea]. Available: <https://sameer-lanka.com/blog/2018/2/19/deep-deterministic-policy-gradientpytorch-dm-control-suite>.
- [5] SMC International Training, «FMS-200 - Sistema didáctico modular de ensamblaje flexible,» [En línea]. Available: <https://www.smctraining.com/webpage/indexpage/287>.
- [6] SIEMENS, «SIMATIC SIMIT Simulation Platform (V10.0) Operating Manual,» 2018.
- [7] SIEMENS, «Virtual commissioning - Session 3 - Advanced virtual commissioning (SiL),» 2018.
- [8] SIEMENS, «Mechatronics Concept Designer Quickstart and User Manual,» 2010.
- [9] SIEMENS, «Operating SINAMICS S120 on a SIMATIC S7-1500 via a Technology Object,» 2016.

## ANEXO I. PRUEBAS REALIZADAS CON UN EJE REAL

Con el objeto de aportar contexto al proyecto, se incluye una versión resumida del informe realizado sobre las pruebas con un eje real [9].

- I. Control manual del eje de posición actuando directamente sobre el variador de frecuencia desde el “Panel de control” de TIA Portal.

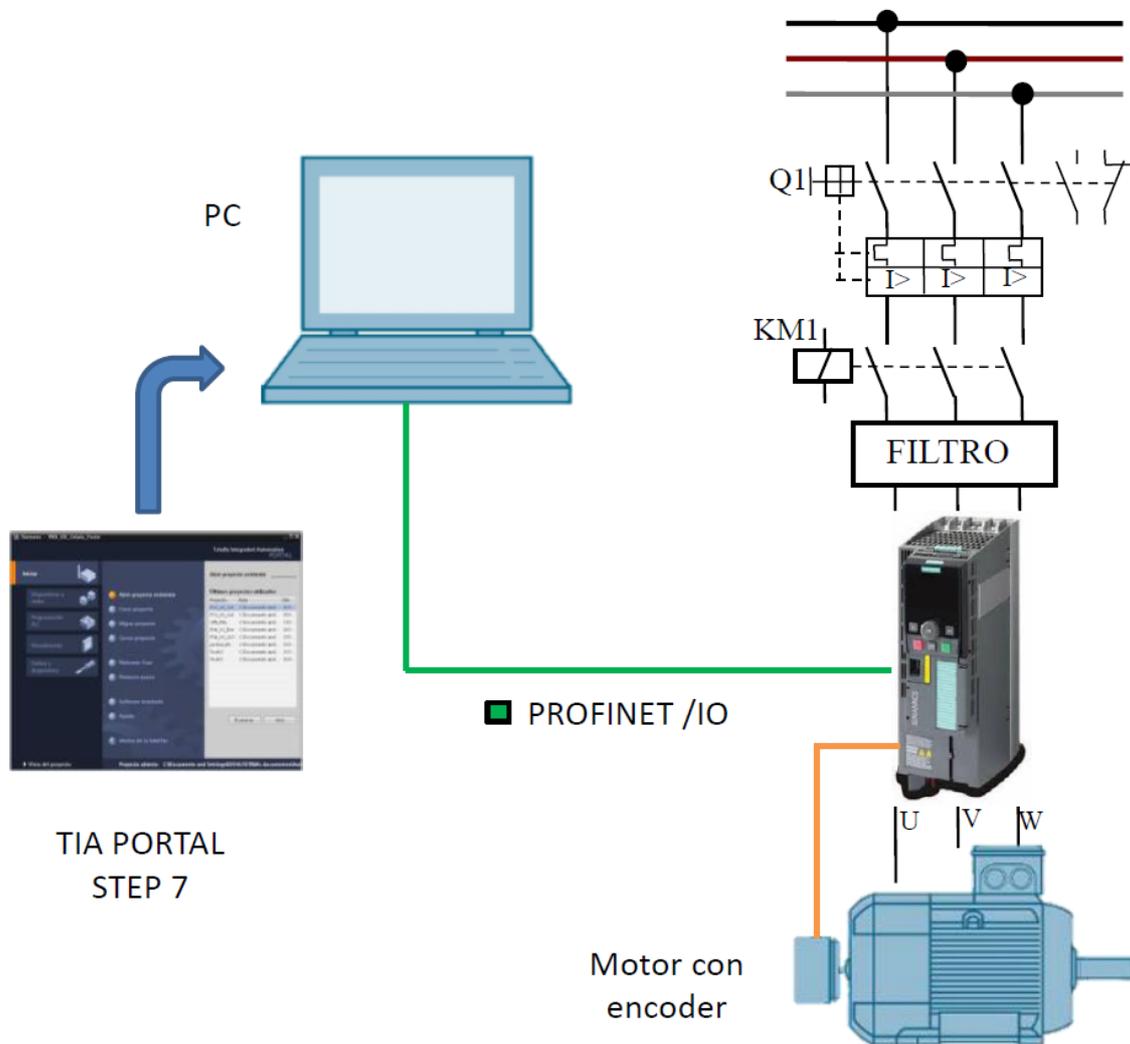


Ilustración 38. Esquema del demostrador utilizado en el apartado I

Para realizar este tipo de control, en primer lugar hay que configurar el accionamiento. Esta configuración se realizará mediante la herramienta Startdrive, incluida en el TIA Portal, donde se seleccionarán los parámetros y características, tanto de los equipos físicos que intervienen como de la aplicación que se desea desarrollar con ellos. En esta prueba no es necesario introducir en el proyecto el PLC, ya que se pueden realizar pruebas de validación directamente desde el TIA Portal con el Startdrive para comprobar el funcionamiento del accionamiento.

- Dispositivos físicos utilizados: Variador de frecuencia Sinamics G120, Motor
- Herramientas de ingeniería: TIA Portal V15.1, Startdrive.

## PROYECTO TIA PORTAL

Se inserta en el proyecto un accionamiento Sinamics G120 con la CU250S-2 PN Vector V4.7 y se le añade la etapa de potencia de referencia 6SL3210-1PB13-8ULx. Se le asigna una dirección IP 192.168.0.149.

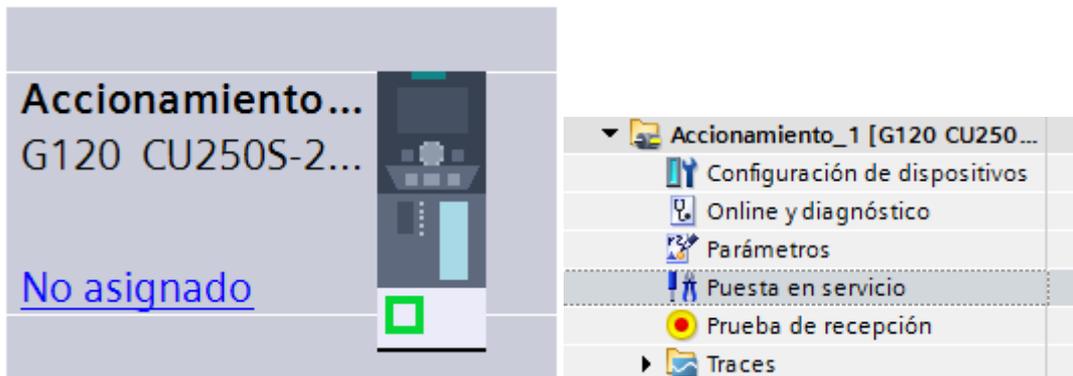


Ilustración 39. Accionamiento Sinamics G120, y estructura de carpetas en el proyecto TIA Portal.

### Accionamiento

El accionamiento se parametriza desde la ventana “Puesta en servicio” con la opción “Puesta en marcha: asistente”. Cuando se abre el asistente, aparece una ventana con diferentes apartados en los que se configura el accionamiento. Existen más apartados que los aquí mencionados, pero en ellos no es necesario modificar nada, por lo que se omiten.

- Clase de aplicación

Existen 3 posibles clases de aplicación: Experto, Standard Drive Control y Dynamic Drive Control. En este caso se utiliza la opción “**Experto**” ya que esta permite configurar un eje de velocidad en lazo cerrado con un encoder.

- Especificación de consigna

Se debe especificar en la configuración que el accionamiento, variador de frecuencia, está conectado vía Profinet IO a un PLC y que la consigna se generará en el PLC en la ejecución del Objeto Tecnológico.

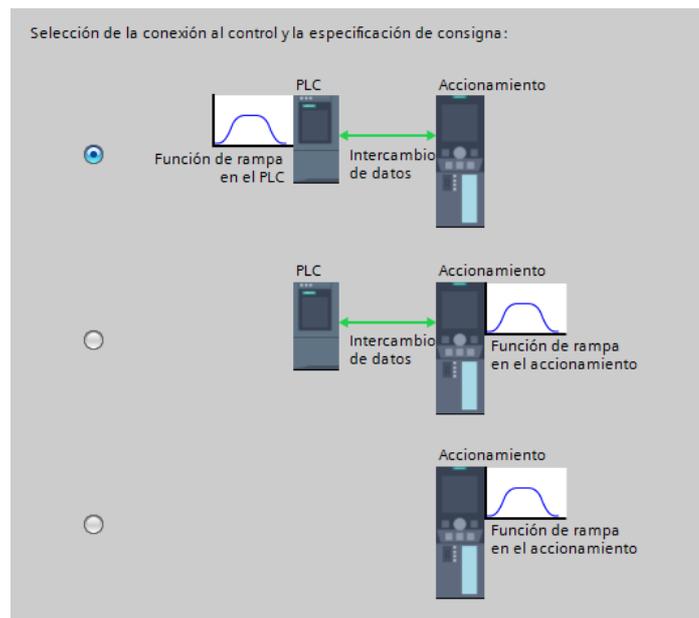


Ilustración 40. Especificación de consigna

- Tipo de control/regulación

En este apartado se seleccionan los "Módulos de función". En este caso no se selecciona ninguno. La opción "Posicionador simple" se utiliza cuando el lazo de posición se cierra en el propio variador. Para el eje de posición que se desea configurar, en "Tipo de regulación" se ha seleccionado la opción "Regulación de velocidad de giro (con encóder)". El resto de opciones son controles V/f, en lazo abierto, con diferentes características de control de par.

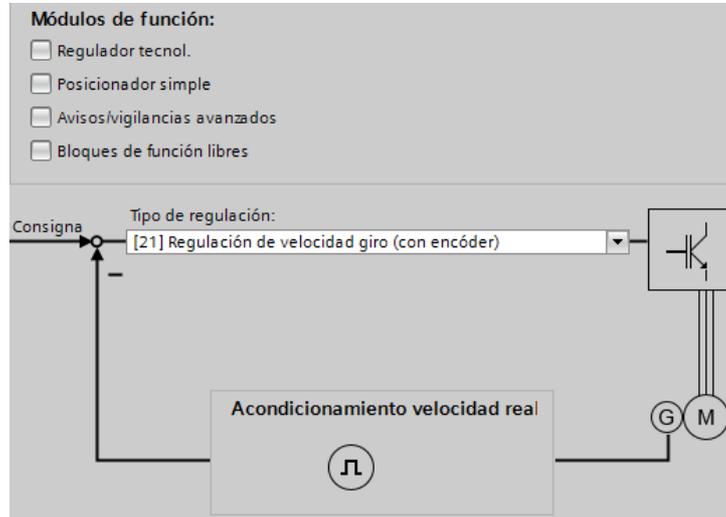


Ilustración 41. Tipos de control/regulación.

- Ajustes predeterminados de consignas/fuentes de mando

En esta campo a se selecciona la configuración de E/S del variador, en este caso se selecciona la opción o macro 7 "Bus de campo con conmutación de juego de datos". Se elige esta opción porque es la más cercana a la comunicación por Profinet IO ya que permite el uso del telegrama 3 de PROFIdrive.

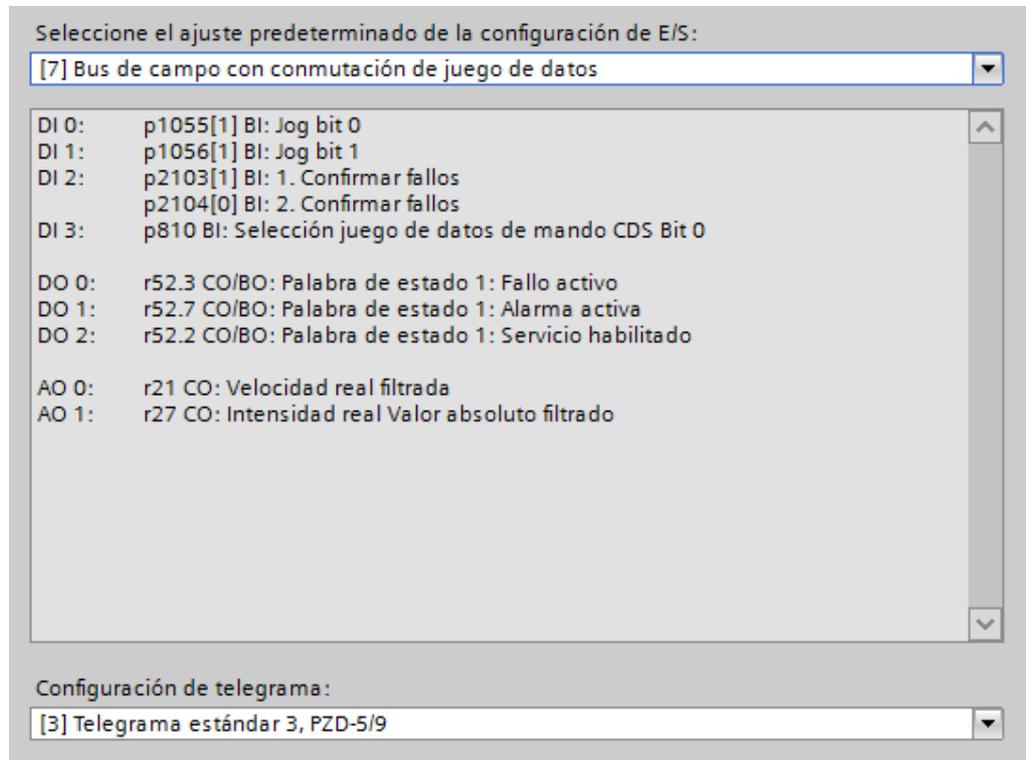


Ilustración 42. Ajustes predeterminados de consignas/fuentes de mando

PROFIdrive define varios tipos de telegramas para el intercambio de información entre los Controladores IO y los Dispositivos IO en Profinet. Para el control de posición se pueden utilizar los telegramas 3 y 5 de PROFINET. El telegrama 5 es adecuado cuando se trabaja con comunicación isócrona. Como el equipo del laboratorio no soporta esta comunicación, se debe usar el telegrama 3. Consta de 5 palabras en el sentido de envío del PLC al variador de frecuencia y de 9 palabras de respuesta en el sentido del variador de frecuencia al PLC

#### - Motor

Hay que introducir en la configuración del accionamiento (variador de frecuencia) las características eléctricas del motor que se va a controlar. Existen dos opciones para introducir las características del motor: introducir los parámetros del motor de "Forma manual" o seleccionar el motor de una "Lista de referencias". En este proyecto se utiliza un motor asíncrono SIEMENS de 0,55Kw y 1.440 rpm, con la referencia 1LE1003-ODB22-2 que se selecciona de lista de motores estándar que ofrece Startdrive.

- **Parámetros importantes**

Son parámetros relacionados con el funcionamiento del motor. Se introduce como velocidad mínima 0 rpm y como velocidad máxima el doble de la velocidad nominal, 2.880 rpm. Por otra parte, las rampas de aceleración y desaceleración deben mantenerse en 0 para que no interfieran con las rampas especificadas en la programación. No permite parametrizar una velocidad máxima superior al doble de la nominal.

Especifique los valores para los parámetros más importantes:

Límite intensidad:	<input type="text" value="1,88"/>	Aef
Veloc. giro mín.:	<input type="text" value="0,000"/>	1/min
Velocidad máx.:	<input type="text" value="2880,000"/>	1/min
Generador de rampa Tiempo de aceleración:	<input type="text" value="0,000"/>	s
Generador de rampa Tiempo de deceleración:	<input type="text" value="0,000"/>	s
DES3 Tiempo de deceleración:	<input type="text" value="0,000"/>	s

Ilustración 43. Selección de parámetros importantes.

- **Funciones de accionamiento**

En “Aplicación tecnológica” se selecciona la opción [0], accionamiento estándar, ya que le motor no se va a utilizar en vacío. En la “Identificación del motor” se selecciona la opción [12], identificación en parada, para que el motor estime un modelo matemático interno del mismo cuando está parado, modelo útil en ciertas formas de funcionamiento. Por último, en “Cálculo de los parámetros del motor”, se selecciona la opción, cálculo completo de los parámetros del motor.

**Funciones de accionamiento**

Definición del método para medir los datos del motor.

Aplicación tecnológica  
[0] Accionamiento estándar

**i** Durante la primera puesta en marcha se recomienda una identificación del motor. Se recomienda medición en parada para UIF y regulación vectorial. Se recomienda medición en parada y medición en giro para regulación vectorial (solo la medición en giro no tiene sentido).

Identificación del motor:  
[12] Identificar datos de motor (en parada), cambio desp. func.

**i** Con la siguiente habilitación de accionamiento se realiza una única identificación de datos del motor. El motor conduce corriente y puede moverse hasta un cuarto de vuelta. Sin una nueva habilitación de accionamiento, el motor acelera después de inmediato hasta la consigna de velocidad existente.

Cálculo de los parámetros del motor

Sin cálculo

Cálculo completo

**i** Incluye el cálculo de los parámetros para el motor, el control y la regulación, en función de los datos de motor introducidos.

Ilustración 44. Funciones de accionamiento.

- **Encóder**

Para realizar cerrar el lazo de velocidad, se selecciona el encóder 3001 de 1.024 impulsos por vuelta de la lista que ofrece Startdrive y se especifica como interfaz para el encóder, el conector "SUBD" del variador de frecuencia.

De forma resumida se presenta en la Tabla 6 los valores de los parámetros ajustados en el variador de frecuencia.

Apartado	Opción seleccionada	Comentario
Clase de aplicación	Experto	Es necesario seleccionar esta opción para acceder a la configuración del encóder.
Tipo de control/regulación	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Módulos de función:</b> Ninguno</li> <li>- <b>Tipo de regulación:</b> [21] Regulación de velocidad de giro (con encóder)</li> </ul>	No es necesario ningún módulo de función, o no son compatibles con la función deseada.
Ajustes predeterminados	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Configuración E/S:</b> 7 Bus de campo con conmutación de juego de datos</li> <li>- <b>Configuración de telegrama:</b> Telegrama estándar 3</li> </ul>	La configuración 7 es la usada normalmente en las aplicaciones de control de velocidad. Además permite el uso del telegrama 3
Motor	Motor asíncrono SIEMENS de 0,55Kw, con la referencia 1LE1003-ODB22-2	El motor utilizado se puede encontrar en la lista de motores estándar. En caso contrario, se debería configurar manualmente
Parámetros importantes	Véase Ilustración 43	Es necesario no introducir rampas que puedan interferir con la configuración posterior
Encóder	Encóder 3001, interfaz SUB-D	El encóder utilizado se puede encontrar en la lista de encoders estándar

Tabla 8. Parámetros del accionamiento.

Una vez finalizada la fijación de los parámetros, hay que cargar la configuración en el accionamiento G120. Previamente a la carga, se aconseja ejecutar el comando “Restablecer ajuste de fábrica”.

Después de cargar la configuración en el variador de frecuencia, se puede hacer una primera prueba de funcionamiento desde el “Panel de mando” que ofrece Startdrive. Esto es interesante para comprobar que la parametrización del accionamiento se ha realizado correctamente.

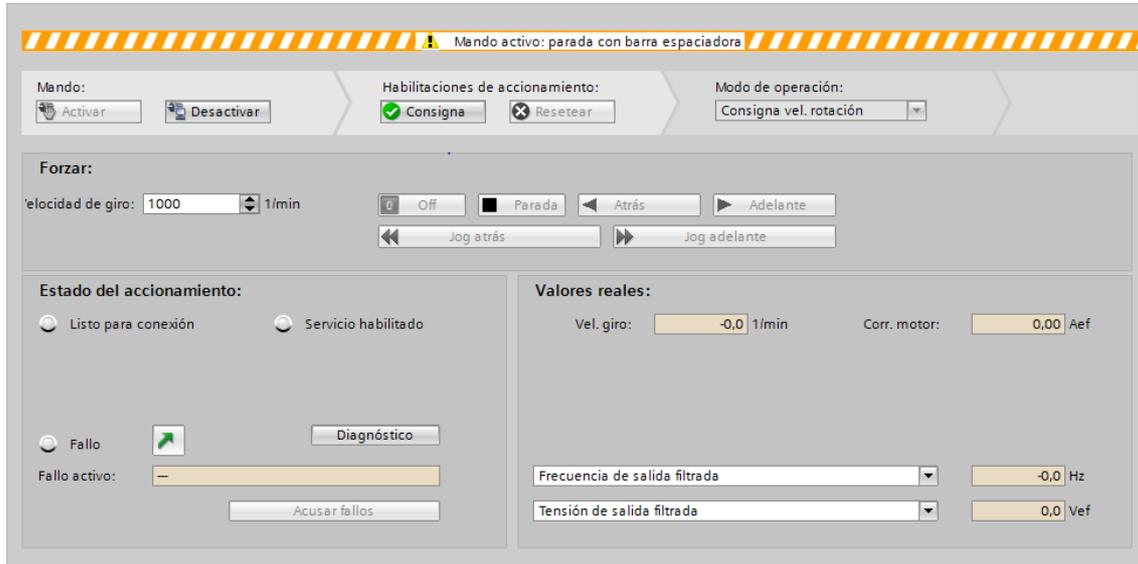


Ilustración 45. Panel de mando de la puesta en servicio del accionamiento.

Para tomar el mando del accionamiento se debe pulsar “Activar”. Para comenzar la operación se debe pulsar además “Consigna”. Para desconectar el panel de mando hay que pulsar en primer lugar “Off”, que desconecta el accionamiento. Después, hay que pulsar “Desactivar”.

En el panel de mando del accionamiento solo existe el “Modo de operación”, “Especificación de consigna de velocidad de giro”. En el campo “Velocidad de giro” se debe introducir la velocidad con la que se desea que gire el motor. Tras introducir la consigna de velocidad, el accionamiento se conecta al hacer clic por primera vez en “Atrás”, “Adelante”, “Jog atrás” o “Jog adelante”.

Pulsando “Adelante” o “Atrás” el motor gira a la derecha o a la izquierda a la velocidad de consigna, alcanzando dicha velocidad sin ninguna rampa de aceleración. Haciendo clic en “Jog adelante” y “Jog atrás” el motor alcanza la velocidad de consigna de forma gradual y gira mientras se está pulsando.

En el campo “Valores reales” se muestran los valores de velocidad y corriente del motor. Además, se dispone de dos indicadores a los que se pueden asociar diversos parámetros seleccionables mediante un menú desplegable. En este caso están seleccionados la “Frecuencia y la Tensión de salida filtradas”. Todos estos valores son útiles para detectar posibles errores, como por ejemplo una mala conexión del encóder al accionamiento. Para descartar este error, se debe comprobar que el signo de la consigna de velocidad y el signo del valor de la velocidad actual coinciden.

Mediante esta prueba, se garantiza que el funcionamiento del motor y del variador de frecuencia es correcto, y que su configuración es la adecuada. Esto ayudará en fases posteriores a descartarlos como fuente de error.

También es posible regresar a este panel de mando para realizar pruebas en cualquier momento del desarrollo del sistema de control, para comprobar si el accionamiento y su configuración siguen funcionando correctamente, o para realizar pruebas con el motor.

## II. Control manual del eje actuando directamente sobre el Objeto Tecnológico ejecutándose en el PLC desde el “Panel de mando” del OT.

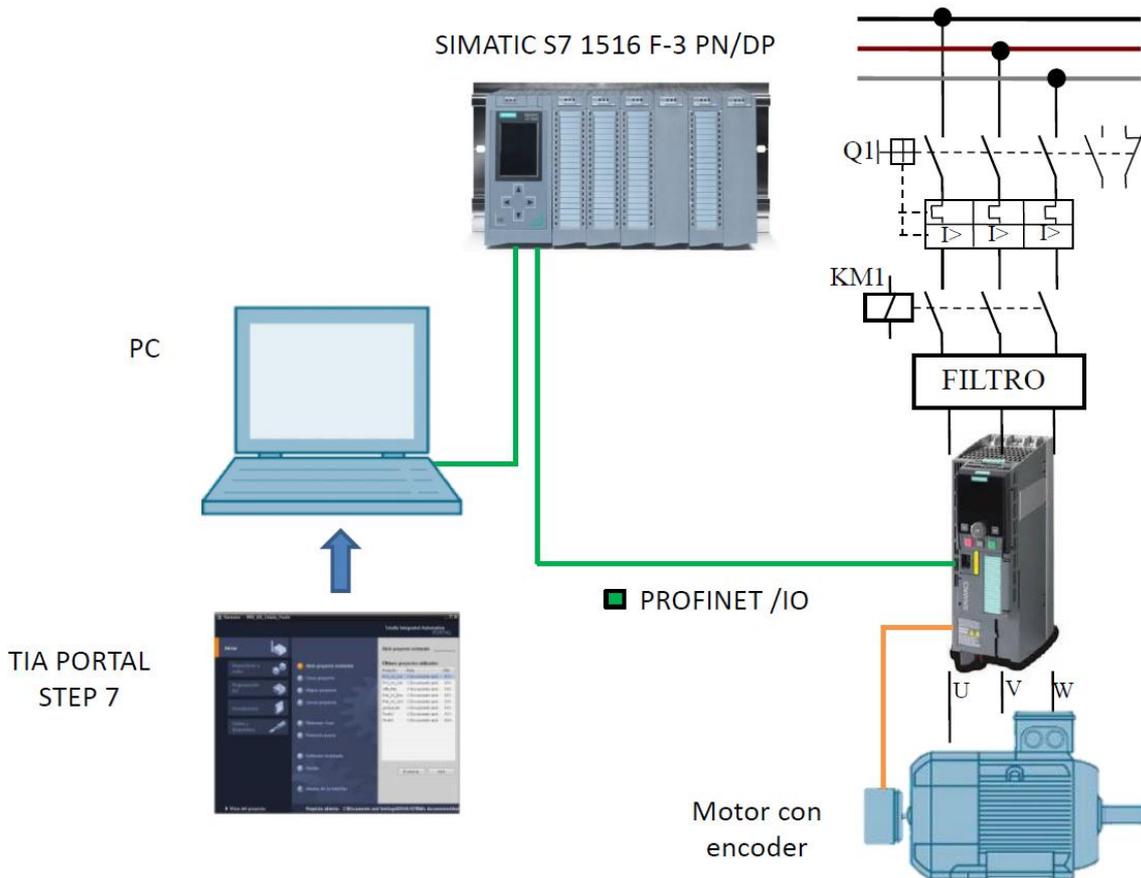


Ilustración 46. Esquema del demostrador utilizado en el apartado II

Para realizar este control se debe utilizar y configurar un Objeto Tecnológico de posición, que se ejecuta en la CPU del PLC. Para la comunicación entre el PLC y el variador se debe crear y configurar, en el proyecto TIA Portal, una red PROFINET IO. El control del OT se puede realizar desde el programa de usuario utilizando FBs de la librería de *Motion Control* o desde su propio “Panel de mando”. Este último caso es el que se aborda en este apartado.

- Dispositivos físicos utilizados: PLC S7 1500 F-3 PN/DP. Variador de frecuencia Sinamics G120. Motor.
- Herramientas de ingeniería: TIA Portal

## PLC

Se inserta en el proyecto TIA Portal el PLC y se le asigna una dirección IP, p.e. 192.168.0.152. Se realiza un enlace de comunicación con Profinet IO entre el variador y el PLC, y se configura el PLC como Controlador IO en PROFINET en esta conexión.

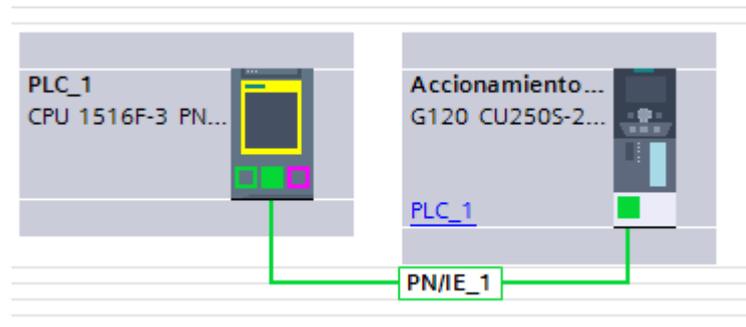


Ilustración 47. PLC y accionamiento conectados mediante PROFINET IO.

Se agrega el Objeto Tecnológico "TO\_PositioningAxis" V4.0 en la carpeta "Objetos tecnológicos", situada en la estructura de carpetas del proyecto en TIA Portal. Posteriormente se deberá configurar.

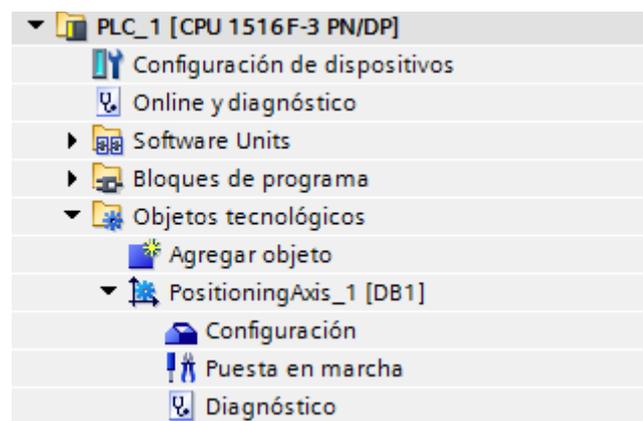


Ilustración 48. Estructura de carpetas del PLC, con un objeto tecnológico de tipo "TO\_PositioningAxis"

Se ha obviado la configuración del OT, ya que el proceso es el mismo que el detallado en el apartado correspondiente del proyecto.

Una vez configurado el hardware del PLC y configurado el OT del eje de posición en el proyecto TIA Portal, hay que cargar en el PLC ambas configuraciones y poner el PLC en RUN. También hay que conectar el PLC a la red Profinet inicial formada por el PC con TIA Portal y el variador de frecuencia G120. En esta situación, no se ha desarrollado ningún programa control para la CPU del PLC. Sin embargo, se pueden realizar pruebas de validación actuando en manual sobre el OT desde el “Panel de mando” que se ofrece desde las carpetas del Objeto Tecnológico.

Para controlar el eje desde la carpeta “Puesta en marcha”, “Panel de mando” hay que pulsar “Asumir”. De esta forma se establece una conexión online con la CPU del PLC y se asume el control del Objeto Tecnológico de posición. Con “Desactivar” se devuelve el control al programa de usuario. En el área “Eje” se habilita o bloquea el Objeto Tecnológico actuando sobre “Habilitar” o “Bloquear”.

El en área “Estado del eje” se muestra el estado del eje y del accionamiento. El estado “Accionamiento listo” se pone a TRUE (verde) al pulsar “Asumir”, quedando el accionamiento listo para ejecutar consignas. El estado “Habilitado” se pone a TRUE (verde) al activar “Habilitar”, lo que indica que el Objeto Tecnológico está preparado para aceptar y ejecutar consignas. El indicador “Error” se activa cuando existe algún error en el Objeto Tecnológico, los errores concretos se muestran en el campo “Error pendiente”. Actuando sobre “Confirmar”, se eliminan las alarmas tecnológicas generadas.

Existen seis modos de operación en el “Panel de mando” del objeto tecnológico de posición:

- Establecer punto de referencia: asigna un valor de posición a la marca de referencia.

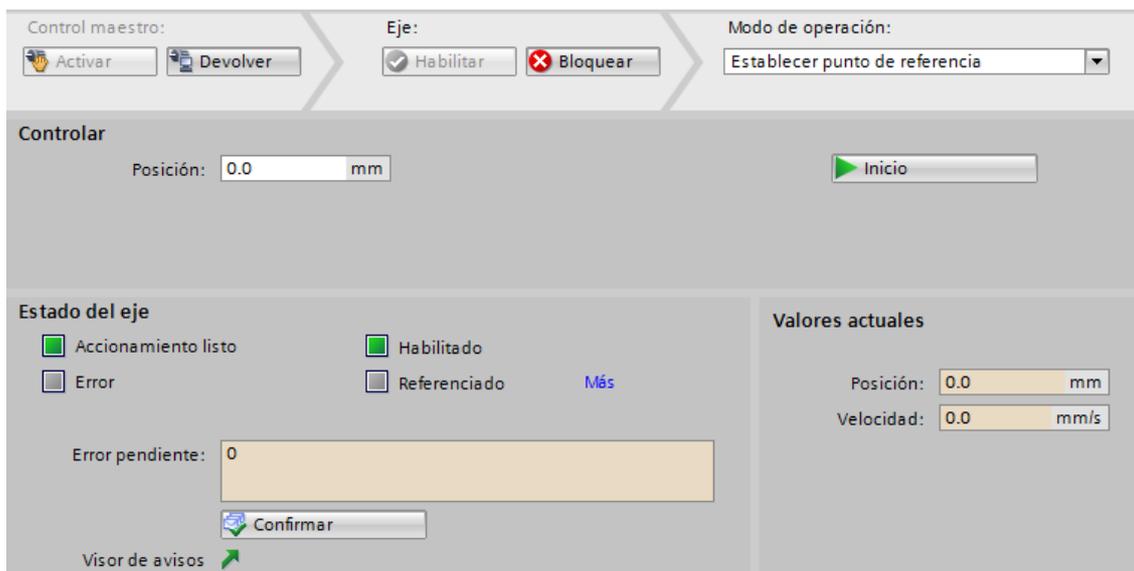


Ilustración 49. Panel de mando del OT en modo “Establecer punto de referencia”.

- **Referenciado:** equivale al referenciado activo. El proceso de referenciado se realiza con los valores de aceleración y deceleración definidos en el panel de mando.

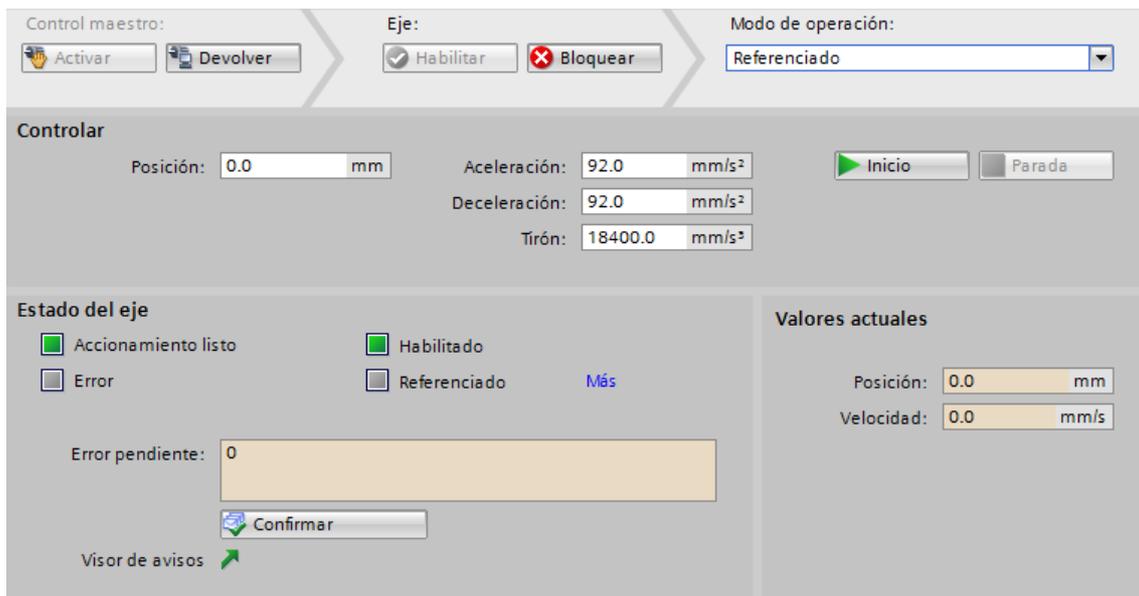


Ilustración 50. Panel de mando del OT en modo “Establecer punto de referencia”.

- **Jog:** se controla el eje de forma manual. Con “Adelante” o “Atrás” se inicia un movimiento en sentido positivo o negativo, respectivamente. El movimiento se ejecuta mientras se mantiene pulsado el botón del ratón.



Ilustración 51. Panel de mando del objeto tecnológico en Modo Jog.

- Consigna de velocidad de giro: el eje se mueve a la velocidad de giro indicada hasta que se detiene el movimiento actuando sobre “Parada”.

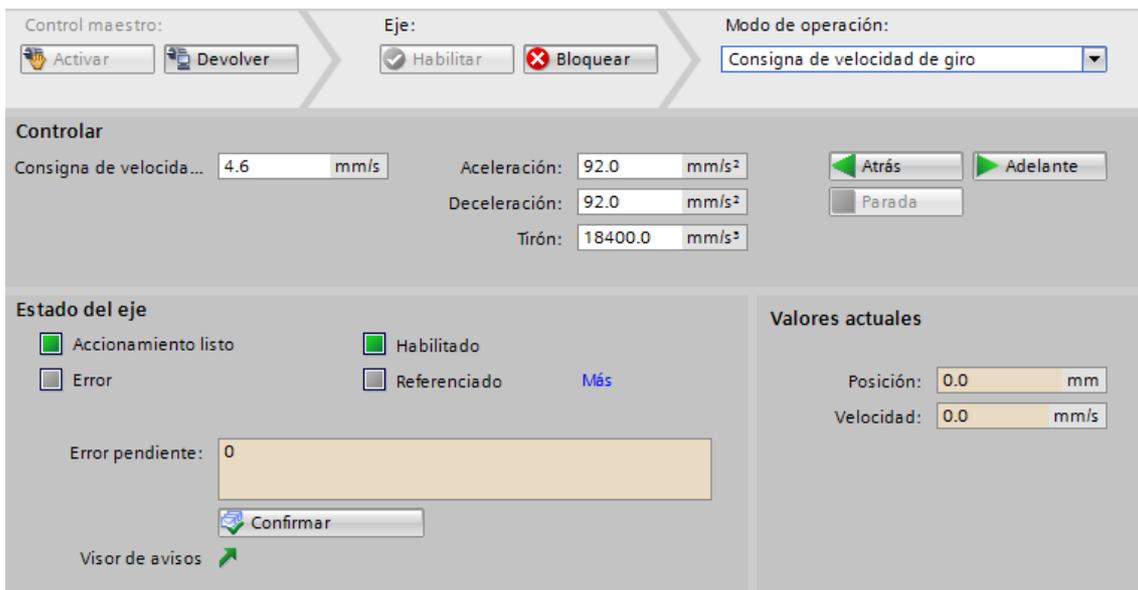


Ilustración 52. Panel de mando del OT en modo “Consigna de velocidad de giro”.

- Posicionamiento relativo: mueve el eje a una distancia determinada respecto la posición actual.

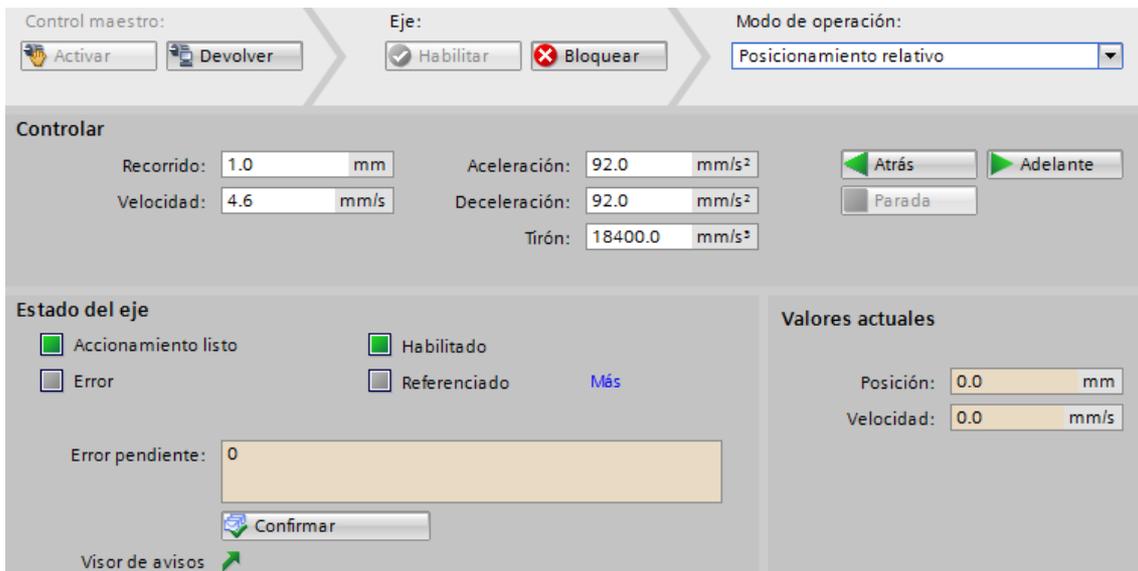


Ilustración 53. Panel de mando del OT en modo “Posicionamiento relativo”.

- Posicionamiento absoluto: mueve el eje a una distancia determinada respecto la referencia.



Ilustración 54. Panel de mando del OT en modo “Posicionamiento absoluto”.

El panel de mando es útil para comprobar que el eje se comporta según lo parametrizado en el objeto tecnológico. De esta forma, se verifica que la configuración del OT es la correcta, y que no existe error de comunicación entre el PLC y el accionamiento.

Una vez depurada la configuración del OT y eliminados los errores surgidos durante esta fase, se descartarán los errores de comunicación y configuración cuando el control del OT se asuma desde el programa de usuario.

En caso de tener ya desarrollado el programa de usuario y querer realizar pruebas con el “Panel de mando” del OT, se debe bloquear la ejecución del programa eliminando las llamadas a los módulos del programa, desde el OB1, para evitar interferencias entre ambas ejecuciones.

### III. Control del eje de posición desde un programa de control en el PLC real utilizando los FBs de la librería de Motion Control y la comunicación vía Profinet IO.

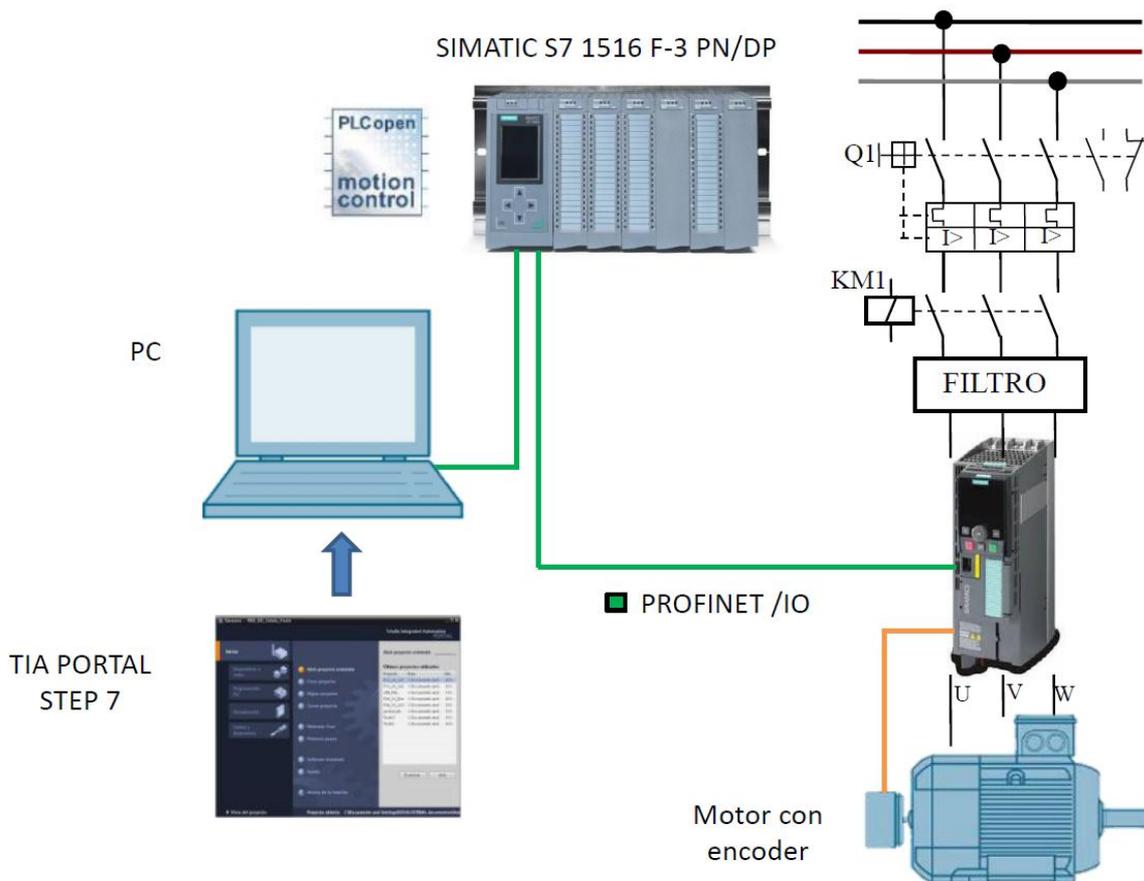


Ilustración 55. Esquema del demostrador utilizado en el apartado 4.3.

En este caso se realiza el control del accionamiento actuando sobre el Objeto Tecnológico de posición desde el programa de usuario, utilizando los FBs de *Motion Control*.

- Dispositivos físicos utilizados: PLC S7 1500 F-3 PN/DP, Variador de frecuencia Sinamics G120 y Motor.
- Herramientas de ingeniería: TIA Portal V15.1.

## Programa de usuario

Para el desarrollo de una pequeña aplicación de control de posición desde la CPU del PLC, se utilizan los siguientes FBs de *Motion Control*:

- MC\_POWER: habilita y bloquea el OT.
- MC\_HALT: para el eje.
- MC\_HOME: referencia el objeto tecnológico.
- MC\_MOVEABSOLUTE: mueve el eje de forma absoluta.
- MC\_MOVERELATIVE: mueve el eje de forma relativa
- MC\_RESET: acusa alarmas y reinicia el objeto tecnológico.

Los FBs de librería se instancian en un bloque de función (FB), o bien en una función (FC) que se llama desde el OB1.

En primer lugar hay que habilitar el Objeto Tecnológico ejecutando el FB "MC\_POWER" con el parámetro "Enable"=TRUE, quedando habilitado cuando "Status"=TRUE. Esta ejecución no cancela ninguna otra instrucción de Motion Control. Sin embargo, al bloquear el objeto tecnológico (parámetro "Enable" = FALSE) se cancelan todas las peticiones de movimiento en el OT conforme al "StopMode" seleccionado, en este caso el 2. Con este modo al bloquear el objeto tecnológico, el eje reduce la velocidad con la deceleración máxima configurada.

En caso de querer parar el eje se debe de activar el FB "MC\_HALT". Con los parámetros "Jerk" y "Deceleration" se especifica el comportamiento dinámico de la parada. Cuando estos parámetros valen -1.0 toman un valor por defecto. Cuando toman valores menores a cero utilizan los valores configurados en el Objeto Tecnológico, y para valores mayores a cero se utiliza el valor indicado.

El proceso de referenciado se realiza con el FB "MC\_HOME", que se lleva a cabo de acuerdo con el modo de operación seleccionado en el parámetro "Mode" y con la configuración realizada en el OT. En este caso se ha seleccionado el modo de referenciado 3, "Referenciado activo". El valor del parámetro "Position" se asigna a la posición del OT cuando este queda referenciado. En este caso se asigna un valor de 10 mm.

El FB "MC\_MOVERELATIVE" mueve el eje de forma relativa, en relación a la posición que hay al iniciar el procesamiento de la petición. Si se introduce un valor de 10 mm en el parámetro "Position", el eje se moverá 10 mm desde su último movimiento.

Para mover el eje de forma absoluta se utiliza el FB "MC\_MOVEABSOLUTE". Si se introduce un valor de 100 mm en el parámetro "Position" y el eje se encuentra en 10 mm, el eje se moverá 90 mm.

Por último, el FB “MC\_Reset” acusa todas las alarmas tecnológicas acusables del programa de usuario. Al acusar se borran también los bits “Error” y “Warning” del bloque de datos tecnológico. Con “Restart” = TRUE reinicializa el OT.

A diferencia del control del eje desde el “Panel de mando”, los FBs de Motion Control permiten el control de más de un eje desde el programa de usuario del PLC, lo que posibilita el desarrollo de aplicaciones complejas de control de posición. El control desde el “Panel de mando” es útil en la fase inicial del desarrollo del proyecto, para probar ciertas funcionalidades, tanto del accionamiento como del OT. Sin embargo, la aplicación final deberá ser controlada, de forma automática, sin intervención del operador, desde un programa de control que se ejecute en la CPU del PLC.