



Trabajo Fin de Máster
“Máster Universitario en Microelectrónica:
Diseño y Aplicaciones de Sistemas
Micro/Nanométricos”

Análisis de la arquitectura hardware y software de un sistema pick and place totalmente automatizado para el transporte y posicionamiento de estructuras aeronáuticas.

Jose Manuel Díaz Madrid

Tutores / Advisors

Ricardo Carmona Galán

Juan Antonio Leñero Bardallo

Septiembre 2022

Contenido

1.	Descripción del proyecto.....	6
1.1.	Objetivo	6
1.2.	Alcance	6
1.3.	Localización de elementos y layout	7
1.4.	Proceso de pick and place	10
1.5.	Requisitos sistema Pick and Place en industria aeronáutica	11
2.	Relación con los contenidos del master.....	13
3.	Fases de un proyecto aeronáutico	16
3.1.	Etapas de un proyecto aeronáutico	16
3.2.	Participación en las distintas fases del proyecto	17
4.	Arquitectura hardware.....	19
4.1.	Descripción.....	19
4.2.	Diagrama de bloques	19
4.3.	PLC.....	20
4.3.1.	Descripción	20
4.3.2.	Características	21
4.3.4.	Descripción operativa básica.....	22
4.3.5.	Diagrama de bloques.....	24
4.4.	IO System	26
4.5.	Sistema Motion	28
4.5.1.	Motion Control PLC	29
4.5.2.	Drive system	32
4.5.3.	Servomotores	36
4.6.	Comunicaciones	38
4.6.1.	Descripción general	38
4.6.2.	Profinet.....	38
4.6.3.	Profisafe	42
4.6.4.	IO Link.....	45
4.6.5.	OPC UA	46
4.6.6	Uso de los sistemas de comunicaciones	46
4.7.	Sistema de seguridad integrada.....	47
4.7.1.	Descripción	47

4.7.2.	PLC de seguridad	48
4.7.3.	Entrada/Salida de seguridad	49
4.7.4.	Setas de emergencia	50
4.7.5.	Barreras laser	52
4.7.6.	Escáner de seguridad	53
4.7.7.	Detector de seguridad.....	54
4.7.8.	Cerraduras de seguridad	55
4.8.	HMI(Human Machine Interface)	56
4.8.1.	Descripción	56
4.8.2.	Hardware.....	56
4.8.3.	Entorno de programación	59
4.8.4.	Pantallas	60
4.9.	Laser tracker	63
4.9.1.	Descripción	63
4.9.2.	Integración	65
4.10.	Encoder óptico para lazo de control de posicionamiento	67
4.10.1.	Descripción	67
4.10.2.	Arquitectura hardware.....	68
4.10.3.	Características principales.....	69
4.10.4.	Comunicaciones	72
4.10.5.	Integración en arquitectura HW del sistema	73
4.10.6.	Integración en arquitectura SW del sistema	74
4.11.	Encoder rotativo.....	76
4.11.1.	Descripción	76
4.11.2.	Arquitectura	76
4.11.3.	Características	78
4.11.4.	Comunicaciones	78
4.11.5.	Integración en arquitectura SW del sistema.....	78
4.12.	Células de carga.....	79
4.12.1.	Descripción	79
4.12.2.	Arquitectura	80
4.12.3.	Comunicaciones	80
4.12.4.	Integración en arquitectura SW del sistema	80
4.13.	Sensor inductivo detección de posición actuadores End effector	81
4.13.1.	Descripción	81

4.13.2.	Arquitectura	82
4.13.3.	Comunicaciones	83
4.13.4.	Integración en arquitectura SW del sistema	83
4.14.	Sensor temperatura IO Link	84
4.14.1.	Descripción	84
4.14.2.	Arquitectura	85
4.14.3.	Comunicaciones	85
4.14.4.	Integración en arquitectura SW del sistema	86
4.15.	Regla de posicionamiento eje Z	88
4.15.1.	Descripción	88
4.15.2.	Arquitectura	90
4.15.3.	Comunicaciones	91
4.15.4.	Integración en arquitectura SW del sistema	91
5.	Arquitectura software	95
5.1.	Entorno de programación, IDE	95
5.2.	Estructura del código	96
5.3.	Código de seguridad	100
5.4.	Algoritmo de posicionamiento secundario eje X	104
5.5.	Algoritmo de reparto de par	105
5.6.	Sistema de sensado de carga	105
6.	Conclusiones	107
7.	Listado de figuras	109
8.	Bibliografía	112

1. Descripción del proyecto

1.1. Objetivo

El objetivo del presente proyecto es el de analizar en detalle la arquitectura hardware y software de un sistema pick and place utilizados por los operarios en la industria aeronáutica para el movimiento de grandes estructuras y posicionamiento con precisión de las mismas.

Se analizará en detalle los sensores empleados, los elementos de control, tales como PLC, drivers para control de movimiento, etc.

Asimismo, se realizará una revisión de la arquitectura software del sistema, algoritmos de control, estructura del código y principales recursos empleados.

Uno de los principales objetivos del proyecto es el posicionamiento de la estructura aeronáutica en un margen de tolerancia de 5 décimas de milímetro, con el fin de realizar las labores de mecanizado y ensamblaje de manera precisa.

1.2. Alcance

Se realizará la descripción de la estación a todos los niveles, sin entrar en detalles del "Know How", de las estaciones y su procesado sobre la pieza ni de las estructuras aeronáuticas para las que está pensada la estación. Asimismo, no se entrará en detalle de la programación de la estación.

La complejidad de la arquitectura hardware y software de un sistema pick and place de este tipo es muy alta. Se va a realizar una descripción detallada de los diferentes elementos que la componen, poniendo especial énfasis en los elementos críticos, sus características particulares y las decisiones de diseño que se han tomado. No se entrará en la concepción en si de las estaciones, ni en el procesado de las piezas y estructuras aeronáuticas. Tampoco en la programación de las estaciones. Lo relevante en el presente trabajo va a ser la revisión de la arquitectura y selección de los diferentes componentes microelectrónicos.

Las metodologías de diseño desarrolladas durante el Máster nos han permitido profundizar en la propagación de especificaciones a través de la jerarquía del sistema y afinar en la resolución de compromisos de diseño.

1.3. Localización de elementos y layout

El sistema pick and place es básicamente una estructura gantry (pórtico), la cual tiene movimiento en los ejes "x" y "z". No existe movimiento en el eje "y", no es necesario ya que las estructuras a transportar disponen de elementos geométricos que fijan esta coordenada durante la fase de posicionamiento. Fijar coordenadas mecánicamente es un proceso por el cual el ajuste de esa variable se realiza mediante elementos mecánicos fijos sobre los que apoya la estructura móvil, por ejemplo, un cono hueco sobre el que una bola (unida a la estructura móvil) apoya.

A continuación, en la Figura 1 Alzado de la estación, se muestran varias imágenes descriptivas del sistema *pick and place*:

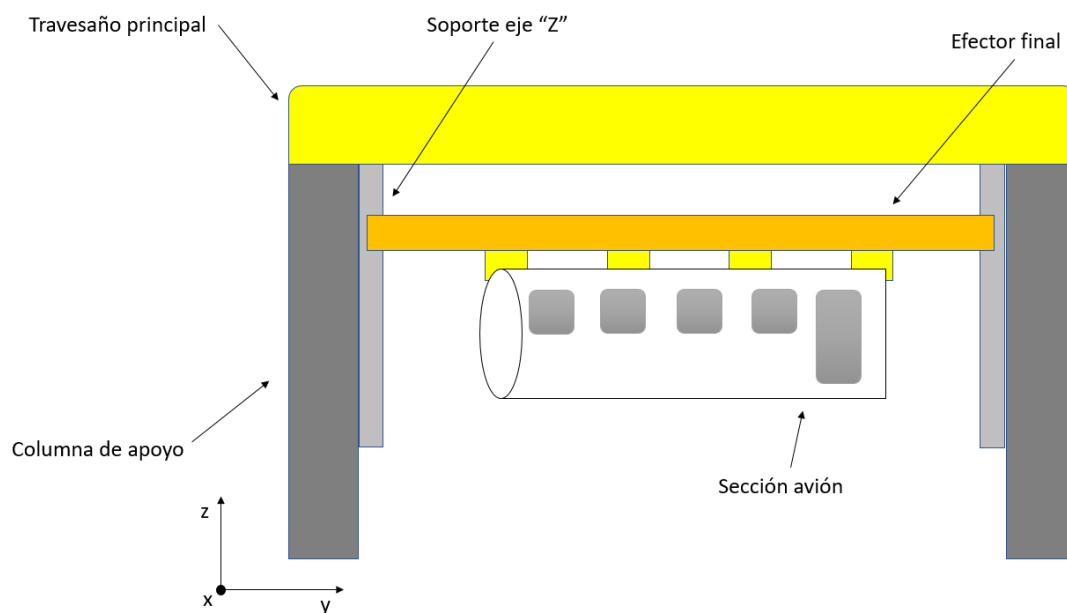


Figura 1 Alzado de la estación

Como se ve en la Figura 1 Alzado de la estación, el sistema pick and place consta de varias columnas de apoyo a ambos lados y que se extienden durante todo el guiado X del mismo. Sobre las columnas se instalan las vigas principales sobre las que se sitúan los guiados del eje X. El sistema de arrastre de este eje está formado por dos servomotores a cada lado del travesaño principal o Gantry (se muestra su localización en la Figura 2 Detalle de guiado y rueda), estos servomotores trabajan en modo reparto de par o tándem, de modo que se reparta el esfuerzo del arrastre del gantry a lo largo de todo el guiado. Este sistema tiene la particularidad de que si una de las ruedas de arrastre de un extremo del gantry desliza por el motivo que sea, todo el par recae sobre la rueda que no desliza, haciendo que la primera de ellas deje de deslizar y vuelva a arrastrar el equipo.

El sistema de arrastre tiene como elemento final una rueda por servomotor que es la que en última instancia agarra sobre el guiado.

A continuación, se muestra un detalle de la guía-rueda en la Figura 2 Detalle de guiado y rueda.

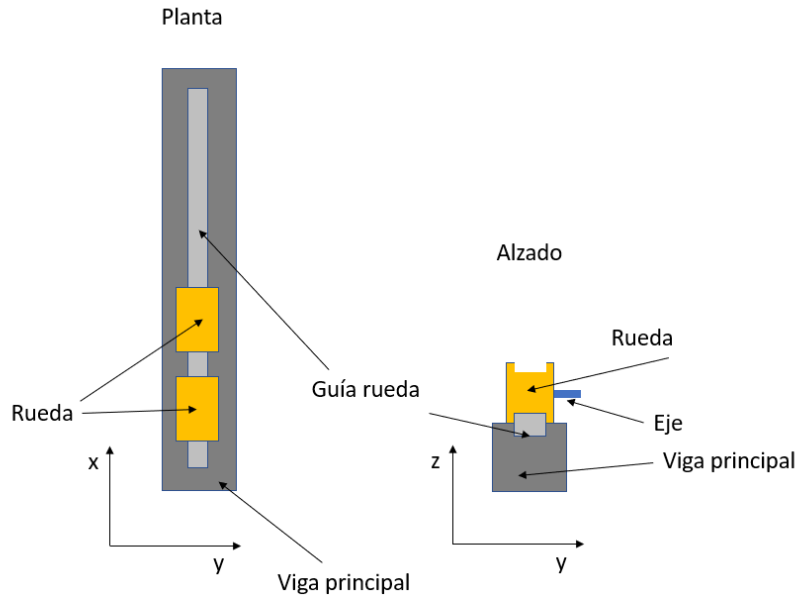


Figura 2 Detalle de guiado y rueda

Este sistema por supuesto, es necesario, pero no suficiente para evitar que el gantry se cruce, esto es que uno de los extremos se adelante o retrase en "x" más de una cantidad de mm respecto del otro, para ello el *pick and place* dispone de dos encoders ópticos lineales dispuestos a lo largo del guiado X que junto con los algoritmos de control y compensación de temperatura mantienen ortogonal el Gantry con el guiado en todo momento y circunstancia.

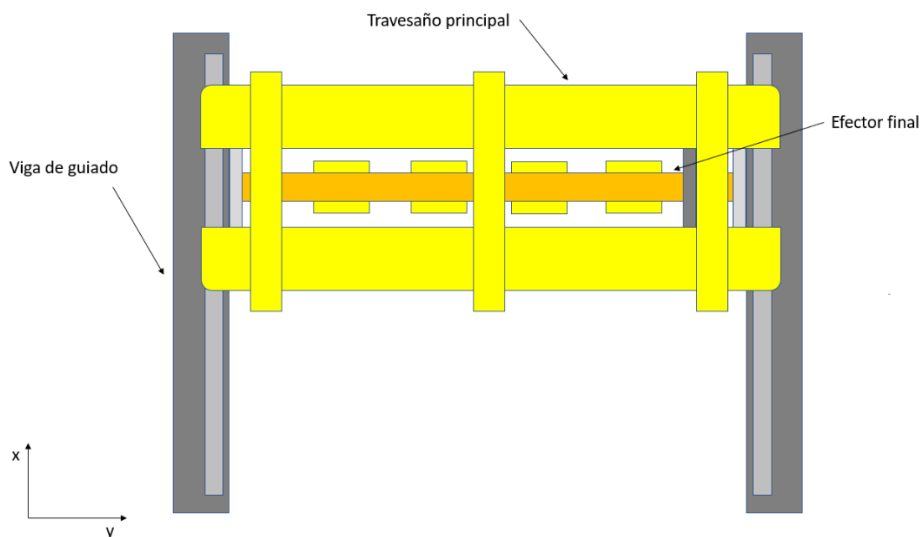


Figura 3 Planta de la estación

La Figura 3 Planta de la estación muestra un plano en planta del pick and place y sus guiados X.

El eje Z es el encargado de izar y descender la eslinga, esta dispone de los end effector que serán los encargados de coger la sección del avión para su transporte a otras estaciones. El eje Z dispone de dos motorizaciones, una a cada lado, formadas por un sistema de husillo, servomotores y encoders lineales para la realimentación de la posición.

Los end effector usados para coger la sección son actuadores de giro que tras encajar en el interfaz mecánico para el transporte de la sección giran 90° para trincar la sección.

A continuación, se muestra un layout de la disposición del *pick and place* en la Figura 4 Layout y las estaciones con las que trabaja. Los espacios entre estaciones son pasillos para el desplazamiento de los operarios

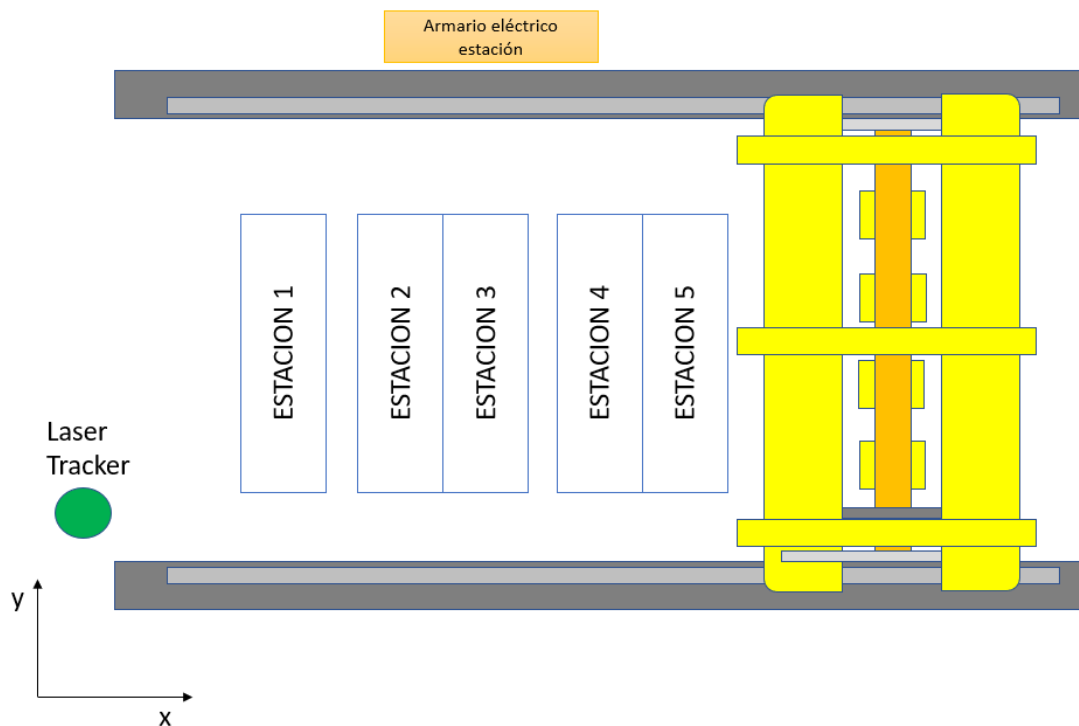


Figura 4 Layout

1.4. Proceso de pick and place

El proceso del sistema pick and place está modelado para poder ejecutar todas sus tareas de la manera más simple y sencilla tanto desde el punto de vista de las operaciones elementales como desde el del operador.

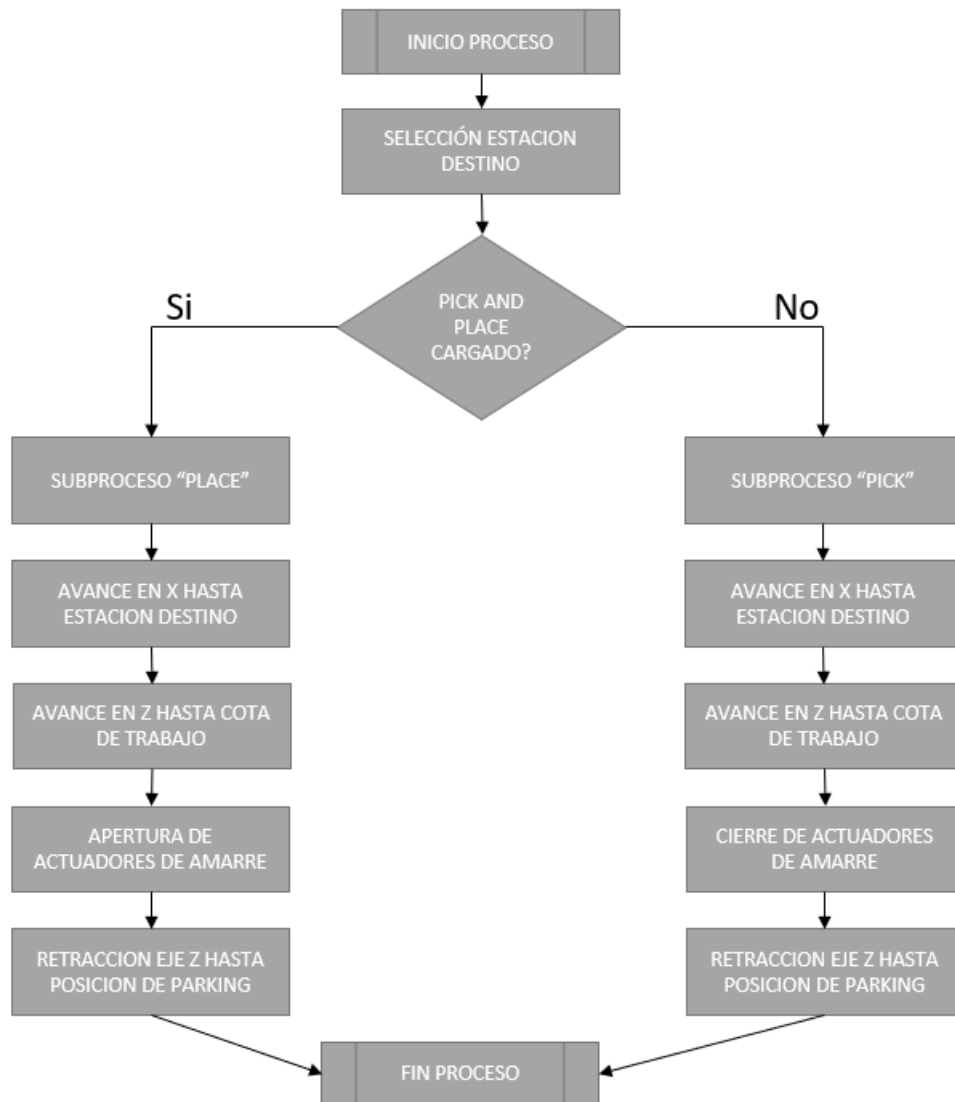


Figura 5 Flujograma de proceso

Este proceso puede lanzarse desde el control de ejecución de la línea, en tal caso, se ejecuta de manera automática, implica que todas las células estén cerradas y con su perimetral validado, esto es que un operador ha validado tanto visualmente como con los elementos de seguridad que no existe nadie en el interior y se han enclavado eléctricamente los cierres y elementos de seguridad perimetral.

1.5. Requisitos sistema Pick and Place en industria aeronáutica

Actualmente, existe una tendencia creciente en automatizar los distintos procesos que se llevan a cabo en la industria aeronáutica, procesos como volteo de estructuras, posicionamiento de precisión para ensamblaje de estructuras que hace unos años eran prácticamente manuales, a día de hoy se han convertido en estaciones totalmente automáticas. Mención especial en lo que se refiere a los procesos de ensamblaje de los distintos elementos del fuselaje de una aeronave, procesos que hasta hace muy poco se realizaban a mano y con elementos de medida externos.

La estación que nos atañe en este proyecto se hace un hueco en la cadena de ensamblaje realizando las labores de posicionamiento de precisión de las secciones de la aeronave dentro de la tolerancia de posicionamiento, 5 décimas de milímetro, 5×10^{-4} m. Teniendo en cuenta que el fuselaje completo ronda los 50m de longitud, estamos hablando de una precisión de $1/10^4$, lo cual equivale en el plano digital a una resolución entre 13 y 14 bits. Este compromiso se traduce en unas especificaciones muy exigentes para muchos de los componentes del sistema.

Esta estación pretende automatizar completamente el proceso de posicionamiento para el acople de secciones y el proceso de posicionamiento en las estaciones de taladrado, remachado y recantado de las secciones. En estas estaciones de procesado se requiere un posicionamiento de alta precisión para reducir al mínimo los errores de posicionamiento y rototraslación de los robots que realizan estas labores.

Esta estación es bastante novedosa en cuanto a las tecnologías empleadas para conseguir una precisión y repetitividad de posicionamiento muy grandes como, por ejemplo, sistema óptico de posicionamiento y feedback de posición mediante laser tracker. Es interesante remarcar que el sistema parte de elementos comerciales de puente grúa para conseguir estas especificaciones. Es una estación concebida solo para este propósito y no se encuentra en el mercado ningún fabricante que disponga en su catálogo de productos un sistema similar a este. Es por ello la especialización que se requiere para la consecución del proyecto en los ámbitos anteriormente mencionados, sensores, procesamiento de datos y algoritmia, comunicaciones, etc.

2. Relación con los contenidos del master

A continuación, se hace referencia al encaje de la temática del proyecto dentro de las salidas laborales que se mencionan en la memoria del título, para las cuales se forma al alumnado:

“Electrónica industrial (Diseño e implantación de sistemas de instrumentación y control de procesos, tratamiento de señal multimedia, consultoría de sistemas TIC, etc...) - Salidas laborales: ejercicio libre de la profesión: proyectos, estudios, consultas y peritaciones demandados por empresas y clientes particulares. Ejercicio de la profesión por cuenta ajena en el sector industrial, diseño y análisis de la automatización y el control de procesos industriales, actividad técnico-comercial, ejercicio libre de la profesión, actividad en diversos sectores industriales (sector electrónico y de comunicaciones, industrias alimentarias, aeronáuticas y de automoción, química, mecánica, etc.), etc.)”.

El desarrollo de un proyecto como es este pick and place, que en un principio podría parecer que una compañía aeronáutica es la indicada para llevarlo a cabo, se desarrolla en el seno de compañías del sector de automatización y electrónica industrial.

La complejidad de los sensores y actuadores empleados, así como los algoritmos de control que corren bajo el PLC y las comunicaciones entre elementos requieren de una alta especialización de los departamentos que lo llevan a cabo.

Una vez la estructura mecánica está definida (el 75% de la misma se puede subcontratar), el proyecto pasa a ser controlado por el jefe de automatización, el cual, junto con su equipo, realizan la fase de diseño de la solución de electrónica y automatización. Cuyas fases son las siguientes:

1. Establecimiento de los requisitos del proyecto
2. Codiseño hardware y software de la solución
3. Definición de los buses de comunicación entre elementos
4. Definición del sistema hardware y software de la solución
5. Definición de sensores
6. Definición de los actuadores
7. Fase de programación y algoritmia
8. Puesta en marcha
9. Fases de testeo de funcionalidad
10. Fase de ajuste
11. Entrega a cliente

En las fases anteriores, el expertise de los ingenieros de diseño se encuentra en el conocimiento profundo de los sensores, buses de comunicaciones y programación de algoritmos para el control de todos los subsistemas concurrentes de que se compone el pick and place.

La formación recibida en el master es de gran importancia de cara a poder analizar los distintos sensores que formarán parte del proyecto, a definir el codiseño hardware-software

que hará usar un PLC u otro, los métodos de test del sistema más adecuados para ahorrar horas y coste, etc.

3. Fases de un proyecto aeronáutico

En este capítulo se va a explicar las fases de las que se compone un proyecto en la industria aeronáutica y la implicación que he tenido en cada una de ellas.

3.1. Etapas de un proyecto aeronáutico

Los proyectos en el sector aeronáutico, se dividen en tres fases principales:

1. Fase de oferta: En esta fase se analizan las especificaciones del cliente con el fin de entender las necesidades del mismo y generar la matriz de requisitos, a partir de la cual se establecen las guías de diseño principales del proyecto. Basado en la matriz de requisitos se realiza una memoria técnica por área, y asociado a la memoria técnica se elabora la oferta económica.
2. Fase de diseño: Una vez se ha llegado a un acuerdo en la parte económica y en la parte de alcance técnico y de plazos, comienza con el hito KOM (kick off meeting). Las distintas áreas de ingeniería comienzan el desarrollo. El área mecánica diseña los modelos de los sólidos, define el proceso y audita los resultados. Automatización comienza el análisis de requisitos y define las arquitecturas hardware y software. En la fase de diseño existen 3 hitos principales, PDR o revisión de diseño preliminar, CDR o revisión de diseño crítico y FDR o revisión de diseño final. Tras CDR se realiza el lanzamiento de los elementos comerciales. Tras FDR se empieza a programar las soluciones de automatización del sistema.
3. Fase de puesta en marcha: En esta fase, se comienza el montaje de las estaciones y las simulaciones de los elementos software en caso de no ser posible la puesta en marcha en las instalaciones del proveedor. La idea principal de esta fase es que los equipos salgan de las instalaciones totalmente probados y validados, al final de esta fase tenemos el hito del CISS, *contractual inspection supplier site*. Durante este hito, un protocolo de pruebas previamente consensuado con cliente se pasa a la estación, dándola como lista para su envío a cliente siempre y cuando no haya ningún punto bloqueante tras las pruebas.
4. Fase de instalación: En esta fase se instalan los equipos en el cliente, tras la instalación se pasa el hito de CIPS, *contractual inspection purchaser site*.
5. Fase de garantía: En esta fase los equipos han pasado a depender del cliente y se da soporte, formación a operarios y se corrigen los fallos de la línea, apuntados en la LOP, lista de puntos abiertos.

3.2. Participación en las distintas fases del proyecto

Los principales roles dentro de un proyecto aeronáutico son:

- *Program manager*: Encargado de gestionar el programa, que engloba todos los proyectos, normalmente un proyecto por estación.
- *Project manager*: Gestor de cada proyecto individual. Coordina con cliente y se encarga de las finanzas y organización general del proyecto.
- Coordinador técnico: Coordina las ingenierías y participa y lidera las fases de diseño.
- *Automation head*: Coordina la automatización y la fase de diseño con el coordinador técnico. Define y lidera al equipo de diseño de automatización y software durante la fase de diseño. Lidera la fase de puesta en marcha e instalación hasta el final del proyecto.
- Responsable de calidad: Elabora los protocolos para validar los requisitos definidos al principio del proyecto.
- Responsable de montaje: Lidera el montaje y puesta en geometría de la instalación mecánica.

Una vez explicados los roles, en el programa de ensamblaje del avión, fui designado AH (*automation head*). Dentro del programa una de las estaciones es el pick and place, en el cual participe en todas las fases desde oferta a instalación como responsable de automatización del mismo, definiendo la arquitectura HW y SW, supervisando la fase de diseño, auditando el código de la estación, coordinando y supervisando la fase de puesta en marcha e instalación y liderando la fase de garantía.

Para llevar a cabo las tareas conté con un equipo de ingenieros de automatización y software a los cuales coordine y supervise en las distintas fases. Durante la fase de diseño, los conocimientos adquiridos en el master sobre sensores e interfaces me fueron de gran utilidad de cara a la selección de los mismos y soporte al resto del equipo. Los conocimientos de procesado y tratamiento de la información fueron de gran utilidad en la fase de definición del sistema de cómputo así como para la definición, programación y optimización de los algoritmos de control de los distintos subsistemas. Por su parte, los conocimientos de Test, los cuales eran totalmente desconocidos hasta su momento, me ayudaron mucho a optimizar determinadas pruebas y concebir otras no exploradas en proyectos similares.

4. Arquitectura hardware

4.1. Descripción

En este apartado se entrará en detalle de la arquitectura hardware del sistema. En primera instancia se mostrará el diagrama de bloques de la misma con el fin de tener una visión general y la conectividad entre elementos. La arquitectura hardware es el apartado más importante ya que define los sensores, elementos de cómputo, actuadores y sistema de comunicaciones a emplear en el proyecto. Sobre esta se asienta la arquitectura software.

4.2. Diagrama de bloques

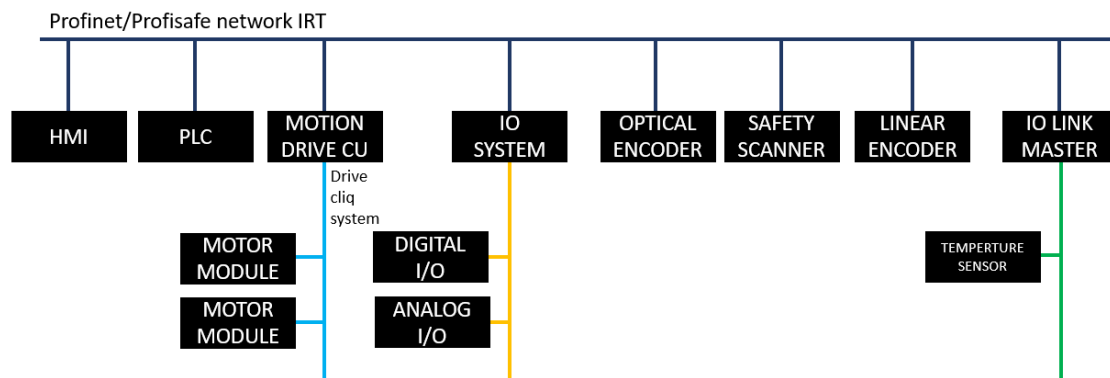


Figura 6 Diagrama de red

Como se muestra en la Figura 6 Diagrama de red, (Moreno, 2004) el sistema conecta los elementos principales a través de Profinet/Profisafe (seguridad integrada sobre Profinet) (Siemens, Simatic Safety - Configuring and programming).

El dispositivo que actúa como maestro Profinet es el PLC. A continuación, se enumeran los dispositivos conectados a la red de comunicaciones y se describen de manera sucinta.

- PLC (programmable logic controller), el PLC es el equipo programable encargado de controlar la máquina. Alberga todo el código de control y los demás elementos actúan como esclavos.
- HMI (Human-machine interface), es el interfaz de que dispone el operador para trabajar con el equipo. Es una pantalla táctil programable.
- Motion drive CU, controlador del sistema motion control, esclavo Profinet del PLC, recibe la consigna de posicionamiento del PLC y se encarga de cerrar los lazos de corriente, velocidad y posición con los servos que comanda (módulos de motor).
- Motor module, también llamados fuentes de alimentación, se encargan de convertir las señales del lazo de velocidad controlado por la CU en ondas PWM para atacar a los servos. Cierra el lazo de corriente.
- IO System, periferia esclava del PLC, dispone de tarjetas de entrada/salida de diversa naturaleza para recibir/enviar señales al medio físico donde trabaja la máquina, estas pueden ser trenes de pulsos, señales analógicas, digitales y de seguridad.
- Optical encoder, el encoder óptico es el sensor que envía la señal de posicionamiento al PLC para que este pueda cerrar el segundo lazo de posicionamiento "Y" del sistema.

- Linear encoder, regla externa que envía señal de posicionamiento al PLC para cerrar el segundo lazo de posicionamiento “Z” del sistema.
- Safety escáner, elemento de seguridad que sirve para detectar personas durante las operaciones de pick and place.
- IO link master, dispositivo maestro del bus IO link que sirve para integrar sensores y actuadores analógicos en un bus digital.

4.3. PLC

4.3.1. Descripción

El PLC es el dispositivo de control de la máquina, se encarga de comandar el resto de elementos o servir como destino de los datos provenientes de los sensores, HMI y otros sistemas de alto nivel de la línea de la que la estación forma parte.

El PLC empleado es de la marca Siemens, en este caso de la familia S7 1500, modelo de gama alta con muchos recursos de control. El modelo usado es un S7 1517TF, donde la “T” indica modelo con recursos HW dedicados para procesado de motion control y la “F” hace referencia a “failsafe”, modelo con recursos HW dedicados para control de elementos de seguridad. (Siemens, Automating with Sinamics S7 1500)

A nivel de sistema comunicaciones dispone de dos interfaces Profinet, una de ellas dispone de un switch de dos puertos. Soporta modo isócrono y puede ser maestro de la red isócrona. Dispone de un servidor web integrado y servidor OPC UA para conectividad con sistemas SCADA o industria 4.0. (Profibus.com)

A continuación, se muestra la Figura 7 s7 1500 del PLC, cuyas dimensiones son 150x150x120mm:



Figura 7 s7 1500

4.3.2. Características

En este apartado se revisarán las principales características del PLC empleado. Estas características son extraídas del datasheet del equipo. La principal característica que hace a este PLC idóneo para la aplicación son los tiempos de procesado de las instrucciones, ya que permiten procesados cuasi isócronos de las señales motion. (Siemens, Automating with Sinamics S7 1500) (Siemens, S7 1500 Motion Control Overview programming guide)

Características eléctricas

- Tensión de alimentación: 24 V nominales (19.2 V a 28.8 V).
- Máximo tiempo de hueco de tensión de alimentación admisible: 5 ms.
- Consumo de corriente: 1.55 A.
- Potencia: 30 W.

Memoria

- Memoria de programa: 3 Mbytes.
- Memoria de datos: 8 Mbytes.

Tiempos de procesado CPU

- Operaciones de bit: 2 ns.
- Operaciones de palabra (W, 16 bits): 3 ns.
- Operaciones aritméticas de punto fijo: 3 ns.
- Operaciones aritméticas de punto flotante: 12 ns.

Bloques de programa

- Máximo número de estructuras de programación OB (bloque de organización), FB (bloque de función), FC (función) y DB (base de datos): 10000.
- Tamaño máximo OB, FB y FC: 512 KBytes.
- Tamaño máximo DB: 8 Mbytes.

OB (organization block)

- Número máximo OB cíclicos: 100.
- Número máximo OB interrupción cíclica: 20.
- Número máximo OB isócronos: 2.
- Número máximo OB de arranque 100.

Temporizadores y contadores

- Número máximo de temporizadores: 2048.
- Número máximo de contadores: 2048.

Rom (retentive memory)

- Tamaño de la memoria retentiva: 768 Kb.

Sistema de entrada/salida

- Número máximo de módulos de entrada/salida: 16384.
- Área de entrada: 32 Kbyte en memoria imagen de proceso.
- Área de salida: 32 Kbyte en memoria imagen de proceso.

4.3.4. Descripción operativa básica

Un PLC es básicamente un computador optimizado para el control industrial. En sus orígenes, durante la década de 1970, eran básicamente microcontroladores con un interfaz de entrada/salida robusto para poder conectar distintos tipos de sensores y actuadores eléctricos, neumáticos e hidráulicos y sin interfaz de comunicaciones, como por ejemplo el *Modicon 084* de *Bedford Associates*. Con el tiempo y el uso fueron tomando entidad propia y acuñándose los términos empleados actualmente. (Moreno, 2004)

Los PLC actuales disponen de un sistema operativo transparente al usuario, que permite programarlos en distintos lenguajes y simula en gran medida el comportamiento de un microcontrolador clásico. A continuación, se explicarán los principales conceptos que permitirán entender el funcionamiento del PLC y sus recursos.

Memoria imagen de proceso: Área de memoria donde se realiza una copia de las entradas y salidas del PLC para que estén disponibles por el programa de control durante un ciclo de scan completo sin cambios. Esta memoria no es retentiva.

OB: bloque de organización, son los bloques principales donde se organiza el código de programa. El general es el OB1, los hay de interrupción hardware, interrupción temporal, de arranque (solo se ejecuta una vez al arrancar el PLC en caliente) ...

DB: Bloque de datos, áreas de memoria RAM/ROM donde se almacenan las variables declaradas por el usuario.

Estados operativos: Los PLC tienen 3 estados operativos,

1. **Startup**, proceso de arranque, se comprueban los esclavos por comunicaciones, se ejecutan los OB de arranque y se actualiza por primera vez la memoria imagen de proceso. Existen varios tipos de startup, cold, warm y hot.
 - a. **Cold**, primer arranque tras la descarga del código de programa.
 - b. **Warm**, arranque tras desconexión de la red eléctrica/apagado del PLC. Las variables almacenadas en RAM tienen sus valores iniciales.
 - c. **HOT**, arranque tras una parada a STOP por cualquier motivo, las variables almacenadas en RAM mantienen los valores de la última actualización del ciclo de scan realizada. Es un rearranque muy delicado y peligroso para operarios y la propia máquina.
2. **Run**, el PLC se encuentra realizando su ciclo de scan.
3. **Stop**, el PLC está parado, bien no dispone de programa de usuario o bien ha habido algún error grave durante el ciclo de scan que ha provocado su interrupción. También puede ser detenido por el programador/usuario a demanda para tareas de mantenimiento y demás.

Ciclo de scan: El ciclo de scan es el hilo cíclico principal del PLC. El ciclo de scan realiza varias acciones de forma secuencia y cíclica.

1. Actualiza la memoria imagen de proceso de las entradas
2. Ejecuta el programa de usuario según la prioridad de los OB.
3. Atiende las interrupciones si las hubiere.

4. Actualiza la memoria imagen de proceso de las salidas según los resultados de los puntos 2 y 3.
5. Actualiza la IO por comunicaciones, Profinet, OPC UA...
6. Vuelve al punto 1.

La CPU de seguridad, y la de motion control, que serán presentadas en la próxima sección, realizan su propio ciclo de scan, con sus recursos HW propios.

El ciclo de scan es una figura de mérito en los PLC, ya que, de forma indirecta, conociendo su duración para un programa dado, se puede hacer una idea de la potencia de cómputo del PLC en cuestión. El tiempo del ciclo de scan, para CPU 1517 suele oscilar entre 2 y 10 ms. Cada ciclo de scan, en función de las condiciones, bucles y demás por los que tenga que pasar el contador de programa tiene una duración u otra. En caso, por ejemplo, dejar un while(true), el ciclo no terminaría, produciendo que el watchdog activase un error llevando la CPU a stop. (Siemens, Programming guideline for S7 1500)

4.3.5. Diagrama de bloques

La siguiente Figura 8 Arquitectura interna PLC, muestra el diagrama de bloques del PLC empleado. (Moreno, 2004)

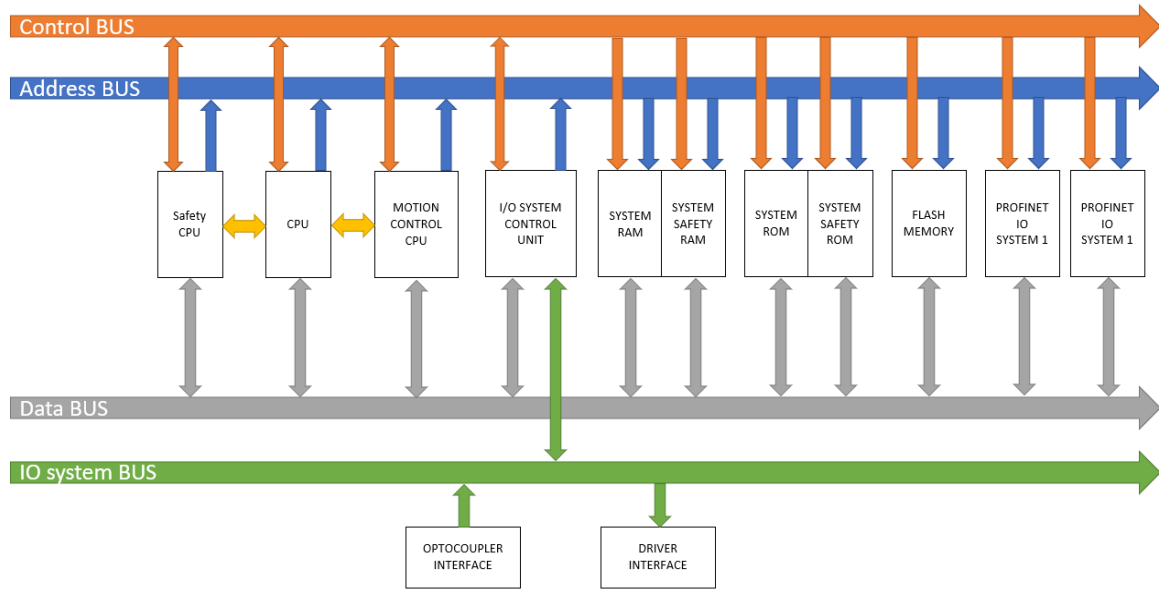


Figura 8 Arquitectura interna PLC

Como se puede observar, existen notables diferencias respecto de un computador ordinario.

El PLC dispone de 3 CPU principales:

- CPU de propósito general, esta CPU es la encargada de gestionar el ciclo de scan, interrupciones, sistema de alarmas, el código de proceso y control de la aplicación que se encuentra en la memoria de programa.
- Safety CPU, esta CPU se encarga del procesamiento del código de seguridad de la máquina. Tiene acceso al bus de control, datos y direcciones para tener acceso total a las distintas memorias del PLC.
- Motion control CPU, realiza los cálculos necesarios para el control de ejes, cierra los lazos de velocidad y posición, interpola trayectorias, sincroniza ejes, etc. Esta CPU tiene acceso al bus de control, datos y direcciones para tener acceso total a las distintas memorias del PLC.

Entre las CPU existe un bus de control y sincronización de modo que se gestiona el acceso a las memorias y la prioridad. La jerarquía se puede configurar, pero presenta la siguiente prioridad por defecto: CPU Safety>CPU Motion>CPU.

Por su parte, la unidad de control del sistema de entrada/salida se encarga de muestrear las entradas y atacar las salidas en sincronía con el ciclo de scan o bien el sistema de interrupciones en caso de estar configurado. Actualiza el área de memoria conocido como imagen de proceso.

Los controladores del interfaz Profinet gestionan los dispositivos de entrada/salida conectados por medio de este protocolo, incluyen sus entradas y salidas en la memoria imagen de proceso para ponerlas a disposición de las CPU. (Siemens, S7 1500 Library)

4.4. IO System

El sistema de entrada/salida es el encargado de recoger y enviar las señales digitales y analógicas a los sensores y los actuadores de la estación. (Siemens, S7 1500 Library)

Este sistema es expandible, y se escala durante la fase de diseño de la estación, de modo que se disponen de las tarjetas de entrada y salida necesarias para el número de elementos a controlar más al menos el 20% de reserva.

Dentro de la familia s7 1500, existen dos tipos de sistemas de entrada/salida:

- Empotrados en el rack del PLC
 - Se acoplan directamente al PLC.
 - No necesitan integración por comunicaciones ya que se consideran built-in.
 - Útiles en máquinas pequeñas que disponen de los elementos sensores y actuadores cerca del PLC.
 - Dimensiones 150x50x120mm (sin tarjetería)



Figura 9 Periferia en rack

- Periferia descentralizada
 - Sistema preferido en máquinas grandes que tienen los sensores y actuadores muy repartidos por toda el área
 - Se integra por comunicaciones
 - Mas pequeñas y compactas
 - Requieren una CPU de periferia para gestionarlas y comunicarlas con el PLC
 - Dimensiones 150x200x70mm (estándar)

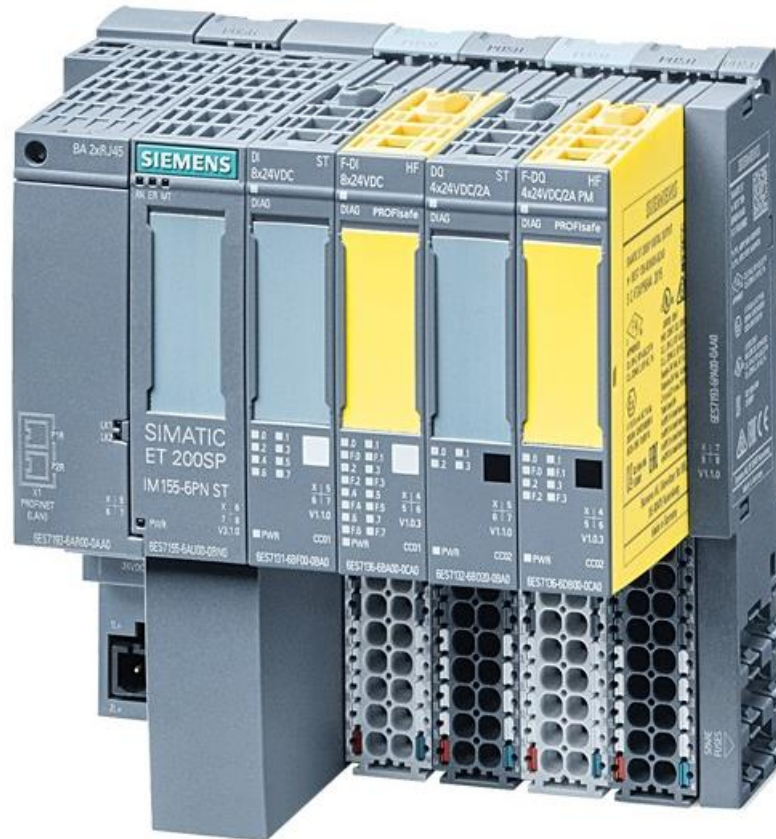


Figura 10 Periferia descentralizada

Todas las tarjetas de expansión se encuentran disponibles para ambos formatos y presentan las mismas características.

Las tarjetas más usadas son las siguientes:

- Entradas digitales, en formato 8 bits, 16 bits...
- Salidas digitales, en formato 8 bits, 16 bits...
- Entradas digitales de seguridad
- Salidas digitales de seguridad
- Entradas analógicas, modos tensión y lazo de corriente
- Salidas analógicas, modos tensión y lazo de corriente
- Entradas de conteo de pulsos
- Salidas de trenes de impulsos
- Expansión de los interfaces de comunicación

4.5. Sistema Motion

El sistema de motion control es el encargado de gestionar y controlar el movimiento y sincronización entre los ejes de que consta el sistema. El sistema de motion control abordado a través de un PLC de familia tecnológica es un sistema HW distribuido en el que los distintos lazos de control empleados son cerrados por distintas entidades HW&SW y los setpoints se generan de alto a bajo nivel. (Siemens, S7 1500 Motion Control Overview programming guide) (W.Bolton, 2001)

Desde el punto de vista de los sistemas de control, el diagrama de bloques y realimentación es la Figura 11 Sistema de control de posición:

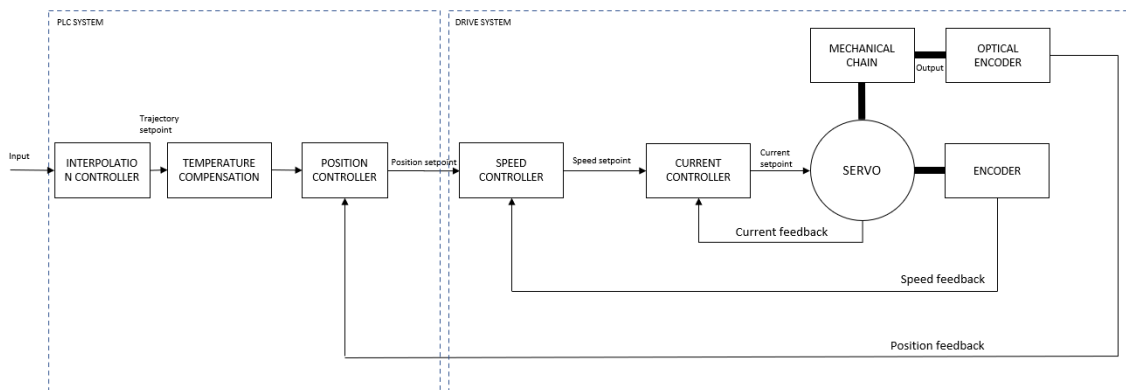


Figura 11 Sistema de control de posición

Tal y como se muestra en el anterior diagrama, Figura 11 Sistema de control de posición, dentro del sistema motion tenemos 3 lazos de control anidados.

- Lazo de control de corriente. Este lazo lo cierra el driver y controla el servo en primera instancia asegurando con realimentación negativa que la corriente consumida por el servo es igual al setpoint establecido. Emplea controladores PID para mantener la consigna de corriente. Se emplean sondas de corriente como elemento sensor.
- Lazo de control de velocidad. Este lazo lo cierra el driver. Emplea el encoder primario del servo. Mantiene la velocidad igual a la consigna, que es modulada por el setpoint de posición.
- Lazo de control de posición. Este lazo lo cierra el PLC. Puede emplear tanto el encoder primario como un encoder secundario. En caso de emplear un encoder secundario las no linealidades de la cadena cinemática y carga son corregidas en lazo cerrado mejorando la dinámica y posicionamiento del eje.

4.5.1. Motion Control PLC

La familia de PLC's de Siemens S7 1500 dispone de recursos HW dedicados para el control de ejes de velocidad, posicionamiento, sincronismo, y *cams*. Para la gestión y creación de este tipo de sistemas de control se dispone de los llamados objetos tecnológicos. Estos son estructuras SW lincadas directamente con recursos HW que permiten al programador trabajar con los ejes en el programa de usuario. A continuación, se explican los conceptos a través de un diagrama. (Siemens, Automating with Sinamics S7 1500) (Siemens, S7 1500 Motion Control Overview programming guide) (Siemens, S120 drive datasheet)

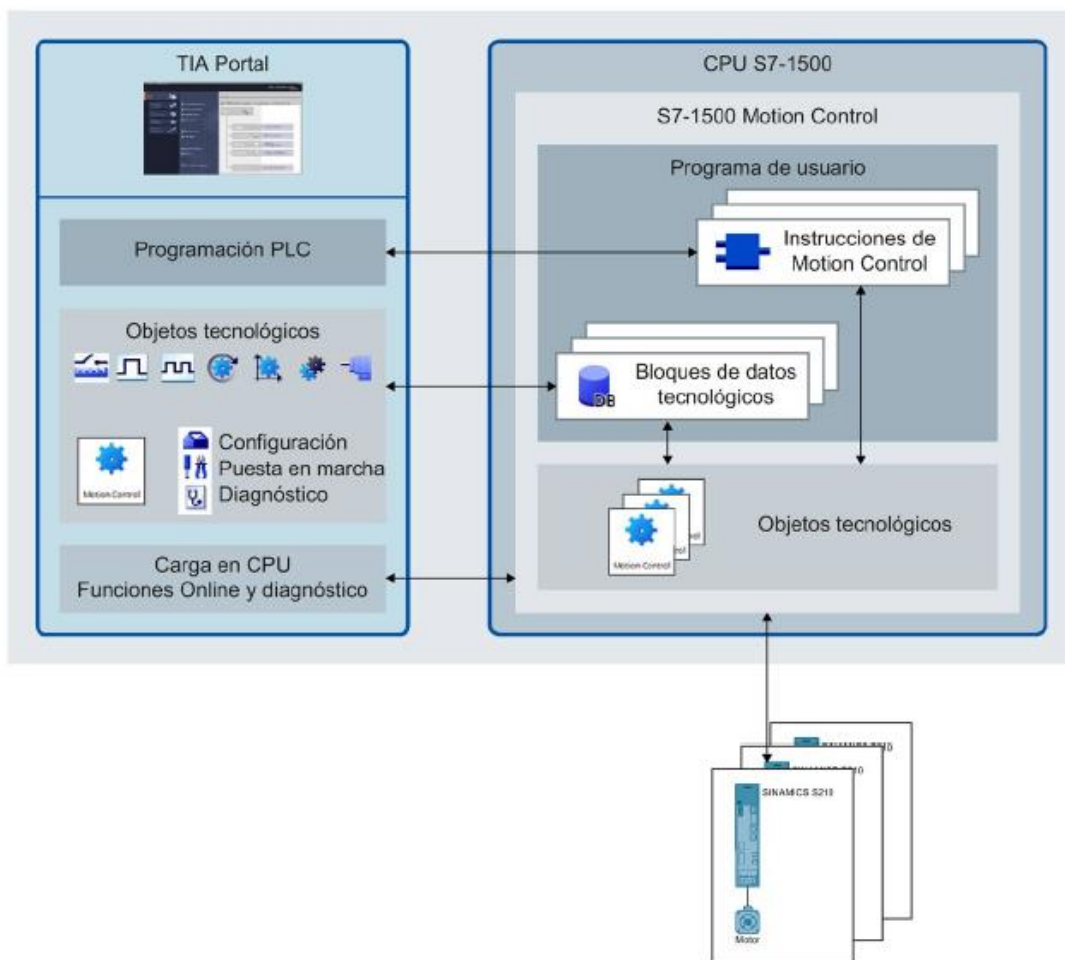


Figura 12 Estructura SW para motion control

Como se muestra en la Figura 12 Estructura SW para motion control, el objeto tecnológico hace de pivote entre el HW dedicado de motion del PLC, el SW y los drivers que atacan los servomotores.

En el apartado de arquitectura SW se detallarán los bloques de funciones empleados para el control de los objetos tecnológicos motion.

En la Figura 13 Tipos de objeto tecnológico, se muestran los tipos de objetos tecnológicos que pueden crearse en el entorno de programación con el fin de modelar cualquier tipo de solución motion.











Símbolo	Objeto tecnológico	Descripción
	Eje de velocidad de giro	El objeto tecnológico Eje de velocidad de giro ("TO_SpeedAxis") sirve para especificar la velocidad de giro de un accionamiento. El movimiento del eje se programa con instrucciones de Motion Control.
	Eje de posicionamiento	El objeto tecnológico Eje de posicionamiento ("TO_PositioningAxis") sirve para posicionar un accionamiento con regulación de posición. Con las instrucciones de Motion Control se envían órdenes de posicionamiento al eje desde el programa de usuario.
	Eje sincronizado	El objeto tecnológico Eje sincronizado ("TO_SynchronousAxis") contiene todas las funciones del objeto tecnológico Eje de posicionamiento. Además, el eje se puede conectar a un valor conductor de modo que siga la variación de la posición de un eje conductor en sincronismo.
	Sustituto del eje conductor (S7-1500T)	El objeto tecnológico Sustituto del eje conductor ("TO_LeadingAxisProxy") representa el eje conductor para el sincronismo local en una CPU en caso de sincronismo de varios PLC. El sustituto del eje conductor evalúa el telegrama de valor conductor y proporciona el valor conductor externo para los ejes sincronizados locales.
	Encóder externo	El objeto tecnológico Encóder externo ("TO_ExternalEncoder") determina una posición y la pone a disposición del controlador. La posición determinada puede evaluarse en el programa de usuario.
	Detector	El objeto tecnológico Detector ("TO_MeasuringInput") detecta posiciones reales de forma rápida, precisa y en función de eventos.
	Leva	El objeto tecnológico Leva ("TO_OutputCam") genera señales de conmutación en función de la posición de un eje o de un encóder externo. Las señales de conmutación se pueden evaluar en el programa de usuario o conectar a salidas digitales.
	Pista de levas	El objeto tecnológico Pista de levas ("TO_CamTrack") genera una secuencia de señales de conmutación en función de la posición de un eje o de un encóder externo. En este proceso se superponen hasta 32 levas individuales y se emiten las señales de conmutación como pista. Las señales de conmutación se pueden evaluar en el programa de usuario o conectar a salidas digitales.
	Perfil de levas (S7-1500T)	El objeto tecnológico Perfil de levas especifica una función de sincronismo $f(x)$ a través de la cual se acoplan el eje conductor y el eje conducido en caso de sincronismo por perfil de levas. La función $f(x)$ se define mediante puntos de interpolación o segmentos. Los rangos que faltan se interpolan. El objeto tecnológico Perfil de levas del tipo "TO_Cam" puede abarcar hasta 1000 puntos y 50 segmentos. El objeto tecnológico Perfil de levas del tipo "TO_Cam_10k" puede abarcar hasta 10 000 puntos y 50 segmentos.
	Cinemática (S7-1500T)	El objeto tecnológico Cinemática ("TO_Kinematics") se utiliza para conectar los ejes de posicionamiento y los ejes sincronizados a una cinemática. En la configuración del objeto tecnológico Cinemática se interconectan los ejes conforme al tipo de cinemática configurada.

Figura 13 Tipos de objeto tecnológico

En función de la potencia de la CPU empleada se dispone de recursos de motion control. Dependiendo de la complejidad de interpolación y seguimiento de cada uno de los objetos anteriores, se necesitará una cantidad de recursos de motion. A continuación, se muestra el consumo de recursos por parte de la CPU de cada uno de ellos.

Recursos de Motion Control

Cada CPU ofrece una cierta cantidad de "Recursos de Motion Control". Encontrará todos los recursos de Motion Control disponibles en los datos técnicos de la CPU empleada.

Cada objeto tecnológico ocupa recursos de Motion Control:

Objeto tecnológico	Recursos de Motion Control ocupados
Eje de velocidad de giro	40
Eje de posicionamiento	80
Eje sincronizado	160
Encóder externo	80
Detector	40
Leva	20
Pista de levas	160

Encontrará una vista general de los recursos de Motion Control de una CPU en el TIA Portal, en "Herramientas > Carga de la memoria".

Recursos de Extended Motion Control (S7-1500T)

Los objetos tecnológicos Sustituto del eje conductor, Perfil de levas y Cinemática ocupan "recursos de Extended Motion Control". Encontrará el número máximo de sustitutos del eje conductor, perfiles de levas y cinemáticas que pueden utilizarse además de los recursos de Motion Control, en los datos técnicos de la CPU empleada.

Objeto tecnológico	Recursos de Extended Motion Control ocupados
Sustituto del eje conductor	3
Perfil de levas del tipo "TO_Cam"	2
Perfil de levas del tipo "TO_Cam_10k"	20
Cinemática	30

Figura 14 Recursos motion necesarios, fuente: Siemens s7-1500 datasheet

4.5.2. Drive system

El sistema servo Drive es el encargado, como se ha visto anteriormente, en recibir la consigna de velocidad a través de comunicaciones, señal analógica, tren de pulsos, señales digitales y accionar el servomotor en consecuencia.

Un sistema servo drive se compone de varios subsistemas electrónicos para llevar a cabo su tarea, en el siguiente diagrama de bloques se muestra la arquitectura hardware de un drive system de Siemens. (Salvador Martinez Garcia, 2006)

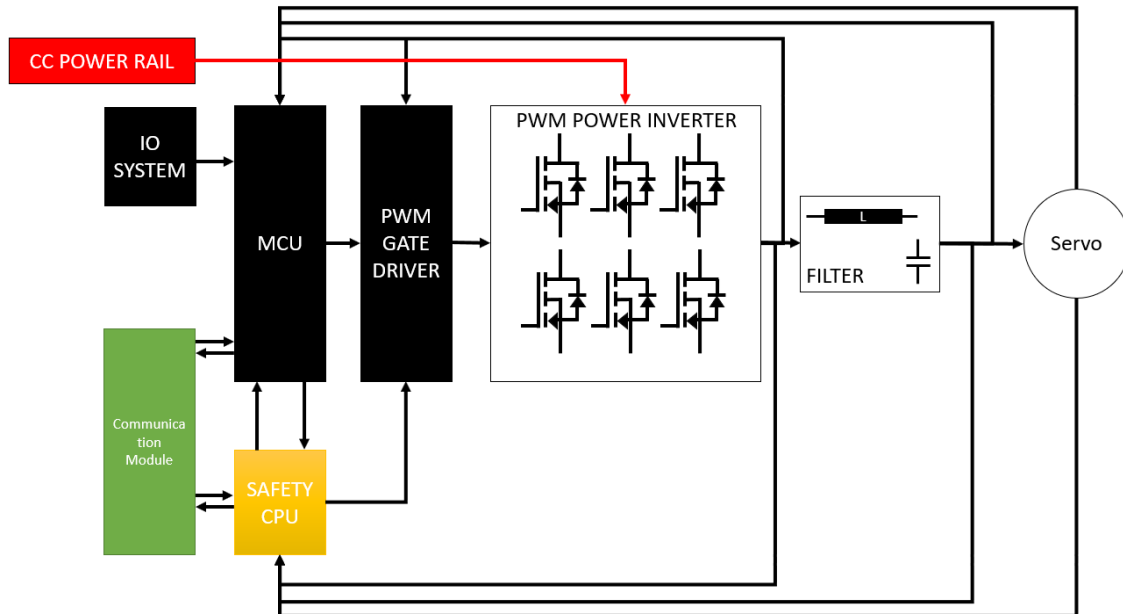


Figura 15 Arquitectura Drive system

El driver se compone de dos elementos principales de control. La MCU (motion control unit) dispone de una arquitectura optimizada para el control en tiempo real. Es la encargada de cerrar los lazos de velocidad y corriente. Dispone de varios procesadores en paralelo para poder trabajar con tiempos de ciclo de 500 us. Tiene bus dedicado con la unidad de comunicaciones, de modo que dispone de acceso IRT (tiempo real isócrono) a la memoria de datos de este módulo para la actualización de consignas y palabras de estado y control. Su salida es la consigna para el módulo PWM que ataca al inversor.

Por su parte, safety CPU se encarga de controlar en tiempo real la seguridad del sistema, al igual que la MCU, tiene acceso IRT al módulo de comunicaciones con el fin de asegurar la desconexión o rampa de frenado en función de las consignas del gestor de seguridad, en este caso PLC de seguridad.

El módulo de comunicaciones implementa la pila de protocolos Profinet/Profisafe, con lo que se integra en el entorno HW del PLC como esclavo isócrono. Recibe y envía telegramas (paquetes de datos Profinet/Profisafe, se explicarán más adelante) al PLC para permitir el control y monitorización de los drivers.

El módulo driver PWM recibe las consignas de corriente de la MCU y se encarga de atacar las puertas de los Mosfet de potencia que componen el inversor, tiene realimentación de la salida PWM antes del filtro de armónicos con el fin de regular su funcionamiento y mejorar la

dinámica de su lazo de control sin pasar por la MCU de nuevo. Este módulo está formado por transistores opto-acoplados con el fin de aislar los circuitos y CPU's de control del inversor de potencia, que trabaja con tensiones de 600V. En algunos suelen emplearse optoacopladores de la familia MOC81XX que alcanzan frecuencias de conmutación de hasta 250KHz y garantizan un aislamiento para tensiones de hasta 5 KV.

La generación de las portadoras PWM con las que se ataca el módulo inversor se realiza comparando la señal a la que se pretende hacer funcionar al servo con una portadora en diente de sierra. (Salvador Martinez Garcia, 2006)

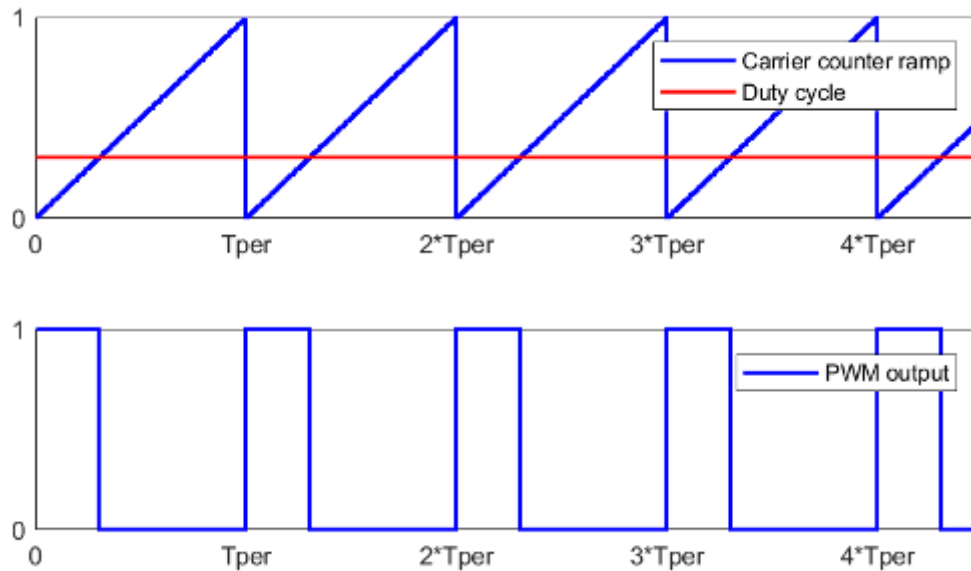


Figura 16 Generación de portadora de control

El módulo inversor de potencia cuenta con transistores Mosfet de potencia que son atacados por los drivers. Estos transistores funcionan en saturación y corte con el fin de minimizar las pérdidas. La salida del módulo inversor es un tren de pulsos de potencia(600V) bipolar en cuyo ciclo de trabajo está modulada la señal con la que se pretende atacar al servo.

El filtro de salida es un LC pasivo de orden N, este filtro elimina el contenido en armónicos de la señal de salida PWM dejando la frecuencia fundamental, la cual es una réplica de potencia de la señal de salida de la MCU. (Siemens, S120 drive datasheet)

Los drivers empleados en este proyecto son de la familia S120 de Siemens. Estos son modulares, configurando el sistema en función de los servomotores a controlar. Cada MCU + Safety CPU puede controlar hasta 8 servomotores. Cada servomotor necesitará un módulo de potencia, y varios de estos módulos de potencia se conectarán a la fuente de alimentación que proporciona el bus de continua de 600V.

A continuación, se muestra la Figura 17 Drive system de una configuración típica de un sistema s120



Figura 17 Drive system

El protocolo de comunicaciones interno entre módulos es Drive cliq. Estos drives están disponibles desde unos pocos cientos de vatios hasta 75KW.

Un esquema de red típico con todas las alternativas de control se muestra en la Figura 18 Esquema de motion system:

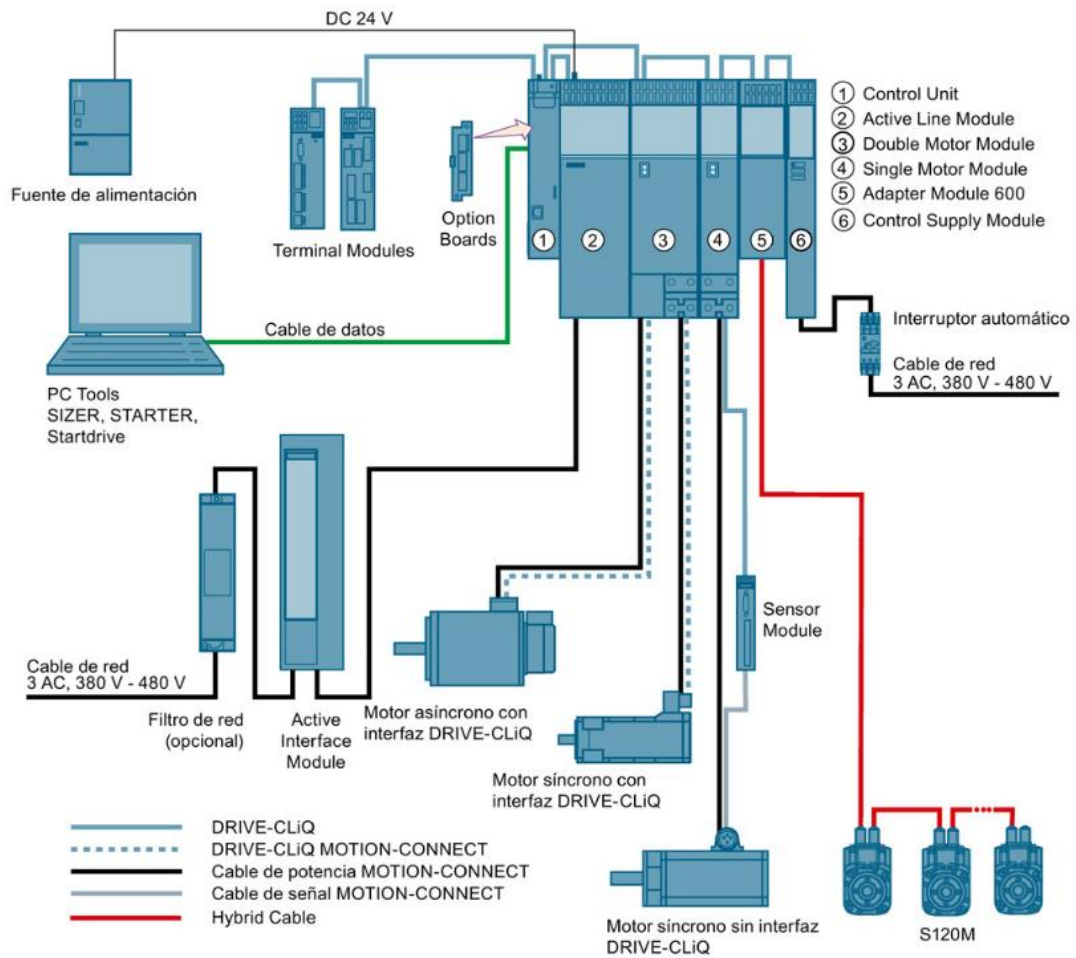


Figura 18 Esquema de motion system

4.5.3. Servomotores

Para el control de movimiento y posición tanto en robótica como en estaciones de máquina herramienta se emplean motores eléctricos. De entre todos los tipos de motores eléctricos, los servomotores son los más usados para las aplicaciones anteriormente descritas.

Los servomotores son motores de corriente alterna síncronos que disponen de un sistema electrónico trabajando en realimentación que les permite mantener una posición angular determinada y sostenerla con un par resistente determinado, además, si la electrónica y el sistema de control son adecuados, pueden hacer un seguimiento de perfiles de velocidad y posición con un error de seguimiento muy pequeño.

Siemens dispone de una gama de servomotores muy amplia y para todo tipo de aplicaciones, desde pequeños servomotores para reducidos end effectors en cabezales robóticos de unas decenas de vatios hasta grandes servomotores para el movimiento de máquinas herramienta de hasta 75 KW. Una de las principales ventajas del sistema de Siemens es que independientemente de la potencia del servomotor, todos se programan y se ponen en marcha de la misma manera. Además, se dispone de un panel de control que permite mover y ajustar las ganancias del lazo de control, filtrar frecuencias de resonancia mecánicas, etc...

Para el control de un servomotor desde el drive se necesita:

- Manguera de 3 hilos para las fases U, V y W que alimentan el motor
- Manguera multihilo para la comunicación con el encoder
- Manguera de dos hilos para el control del freno



Figura 19 Servomotor

La curva característica de un servomotor y con la que se selecciona el servo adecuado según la aplicación es la curva par/velocidad de rotación.

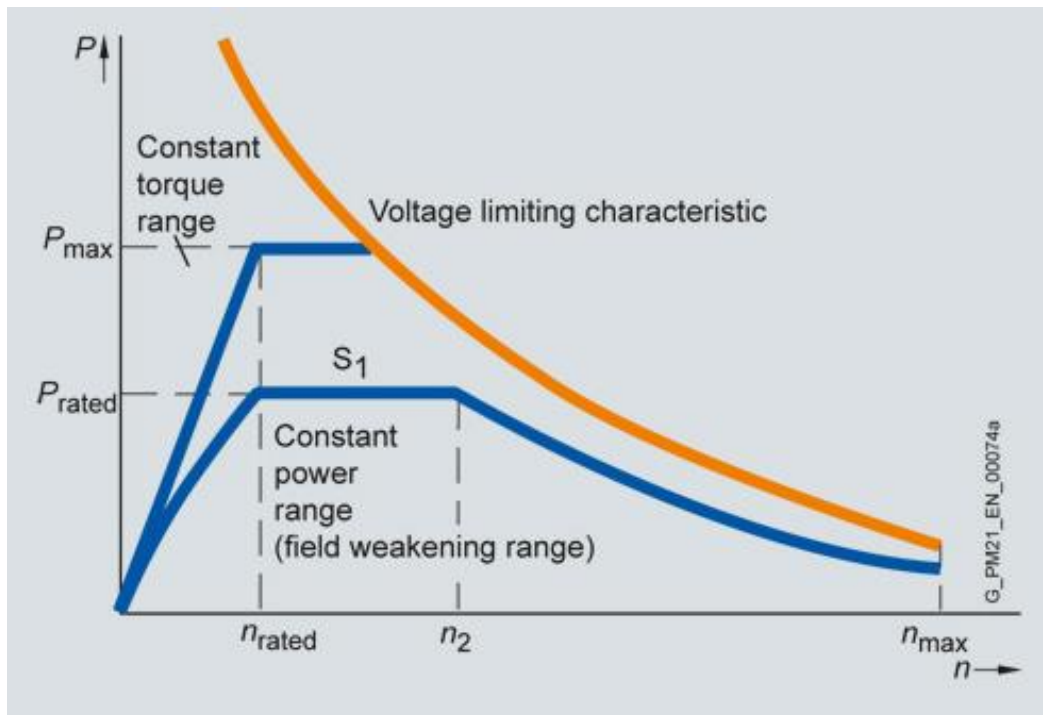


Figura 20 Curva Speed-torque (Siemens, S120 drive datasheet)

Como se muestra en Figura 20 Curva Speed-torque, P indica potencia y n velocidad de rotación. Para la potencia nominal, existen dos velocidades entre las cuales la entrega de par es constante y la respuesta del servosistema es la más lineal posible, por debajo de la primera velocidad, el par es proporcional a la velocidad, por encima de la segunda velocidad, el par decae exponencialmente.

Con esta curva se dimensiona el servomotor a emplear. Lo ideal es trabajar en la zona de par constante, ya que es posible mover la velocidad nominal entregando siempre un par constante, de esta forma la dinámica de la aplicación es constante. Las zonas de arranque y por encima de la velocidad de rotación n_2 la respuesta dinámica no es lineal, por lo que se producen aceleraciones y deceleraciones no modeladas, lo que hace que los lazos de control salgan del punto de consigna dando lugar a pequeñas oscilaciones.

(Siemens, S7 1500 Motion Control Overview programming guide) (Siemens, S120 drive datasheet)

4.6. Comunicaciones

4.6.1. Descripción general

Los sistemas de comunicaciones actualmente son una parte fundamental de cualquier proyecto de automatización. No hay que pensar en el sistema de comunicaciones como un interfaz entre máquinas solamente, ya que las redes internas que interconectan los servomotores, sensores, actuadores y HMI's con el PLC son fundamentales y el éxito del proyecto depende en gran medida de un correcto dimensionamiento y elección del protocolo adecuado.

En este apartado se revisarán los principales protocolos de comunicaciones usados en el sistema pick and place, además de ser los más usados en la industria.

4.6.2. Profinet

El protocolo Profinet es uno de los protocolos de bus de campo más populares y flexibles que existen a día de hoy para la interconexión de toda clase de elementos industriales entre sí. Basado en ethernet, es compatible con redes TCP/IP y permite comunicación en tiempo real duro (IRT, tiempo real isócrono). (Profibus.com)



Figura 21 Logo Profinet

Sus principales características son las siguientes:

- Estándar de comunicación industrial
- Permite comunicación en tiempo real
- Basado en el concepto de Maestro/Esclavo
- Emplea nombres de dispositivo Profinet que tienen que ser únicos en el dominio de la red donde se encuentren
- Trabaja sobre la capa ethernet y es compatible con TCP/IP
- Dispone de una capa para comunicaciones de seguridad llamada Profisafe
- Dispone de herramientas SW gratuitas para puesta en marcha de redes y depuración
- Permite modos de funcionamiento especiales de los equipos, iDevice, Shared Device, ProfiEnergy...

La principal característica por la que es ampliamente empleado en el entorno industrial es su compatibilidad con redes ethernet, su capacidad para comunicación en tiempo real y con seguridad y la simplicidad de puesta en marcha. (Moreno, 2004)

Debido a su compatibilidad con redes TCP/IP se pueden emplear switches de capa 3 para enrutar los paquetes entre dispositivos. Para comunicaciones en tiempo real necesita switches compatibles con Profinet.

La Figura 22 Pila de protocolos Profinet muestra las capas en las que trabaja el protocolo.

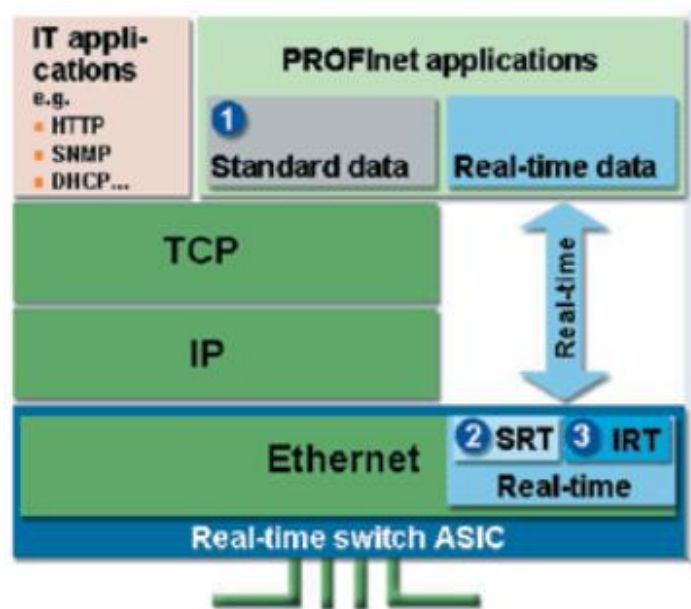


Figura 22 Pila de protocolos Profinet

Como se muestra en la Figura 22 Pila de protocolos Profinet, el protocolo Profinet para comunicaciones no tiempo real emplea las capas de red y transporte TCP/IP clásicas, por ello puede ser direccionado por switches clásicos. Por su parte, para IRT, necesita HW específico.

Para garantizar un tiempo determinista en las comunicaciones en tiempo real, en el ciclo Profinet, se reserva el primer slot de tiempo a estos menesteres, como se muestra en la Figura 23 Ciclo Profinet.

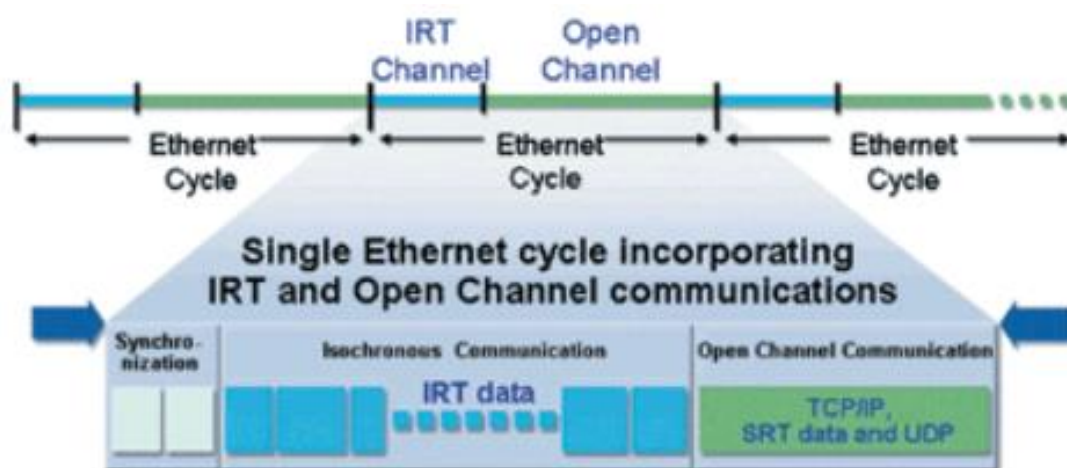


Figura 23 Ciclo Profinet

Como se ha mencionado, se dispone de herramientas gratuitas que permiten realizar la puesta en marcha de manera rápida y eficaz, pudiendo editar los parámetros de red de cada

uno de los dispositivos, así como mostrando la topología de la red. Proneta, de Siemens, es de las más usadas en la actualidad.

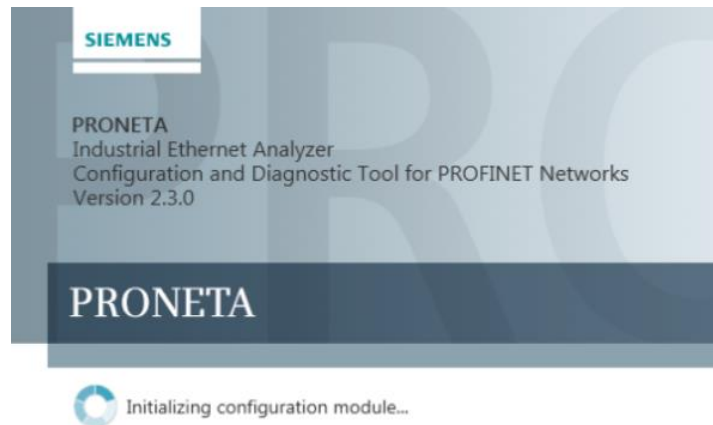


Figura 24 Inicio Proneta

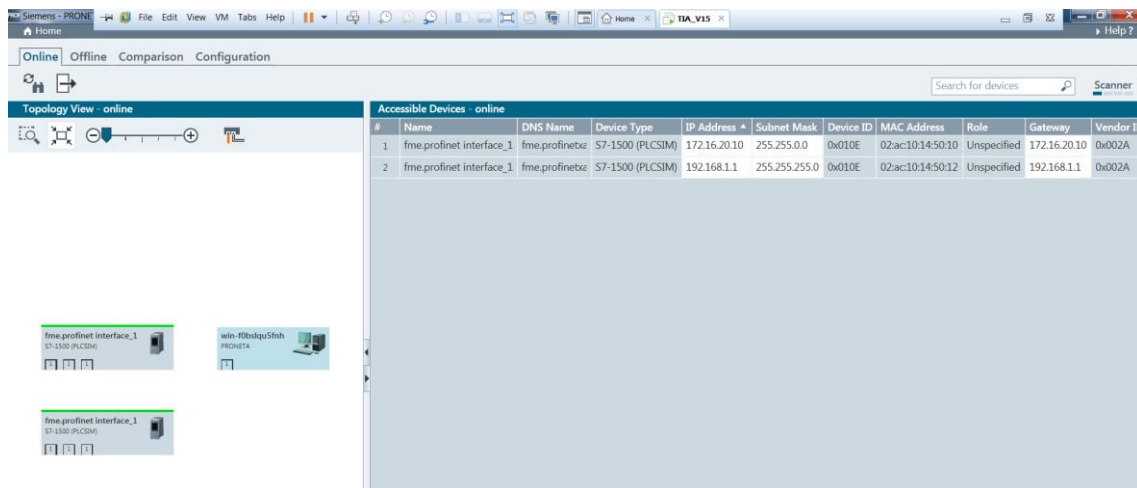


Figura 25 Vista Proneta

Los PLC's de Siemens llevan integrados 1 o 2 interfaces Profinet, de este modo, cuando se describe la arquitectura HW de la aplicación, se dispone de un editor de redes que asigna direcciones IP y los nombres Profinet.

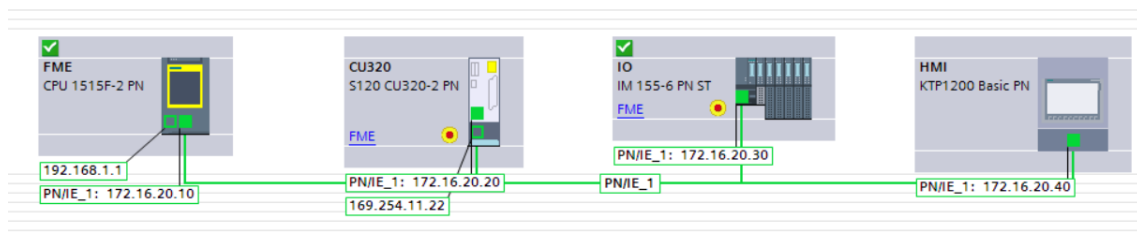


Figura 26 Vista diagrama de red

En la Figura 26 Vista diagrama de red, se muestra un PLC, controlador Profinet, y sus dispositivos esclavos, se muestran las direcciones IP's configuradas y su nombre Profinet en negrita dentro de su recuadro.

Una vez se ha configurado el equipo a nivel HW, se definen sus áreas de transferencia de datos, estos pueden ser de entrada, salida o disponer de ambos. A estos se les asignan direcciones de entrada y salida en el PLC como si de tarjetas de adquisición de datos se tratase.

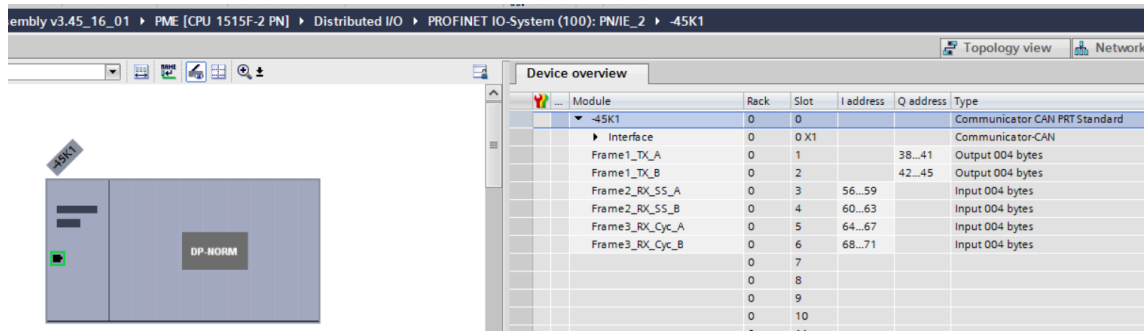


Figura 27 Esclava Profinet

Como se muestra en la Figura 27 Esclava Profinet, al esclavo genérico se le han configurado 2 salidas de 4 bytes cada una y 4 entradas de 4 bytes cada una, estando mapeadas en el PLC para su disposición por parte del programador en las direcciones mostradas.

Un dispositivo que merece especial mención en el mundo Profinet es el acoplador de redes, este aísla diferentes redes y permite el intercambio de datos binarios entre maestros Profinet de sus respectivas redes manteniendo la integridad de las mismas, actúa como si de un router se tratase, para redes Profinet. PN/PN coupler.

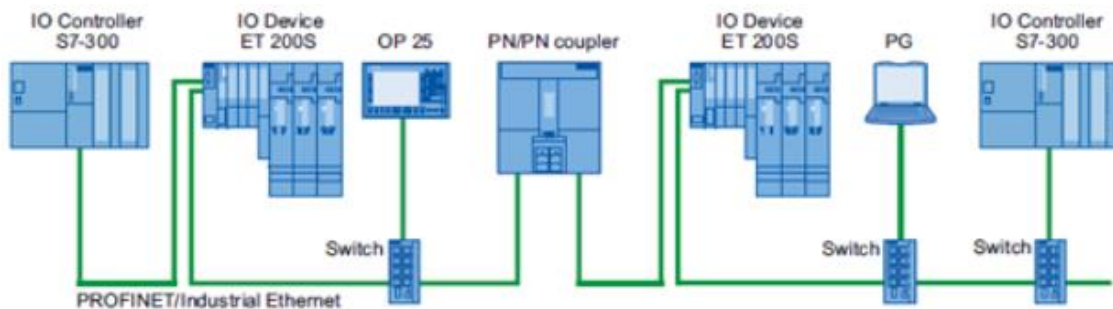


Figura 28 Arquitectura de red con PN coupler

4.6.3. Profisafe

El protocolo Profisafe (Profibus.com) se creó a partir de Profinet para dotar a las comunicaciones de carácter de seguridad. A continuación, se muestra la Figura 29 Arquitectura Profisafe que representa las capas de comunicación ordinaria y de seguridad. (Siemens, Simatic Safety - Configuring and programming)

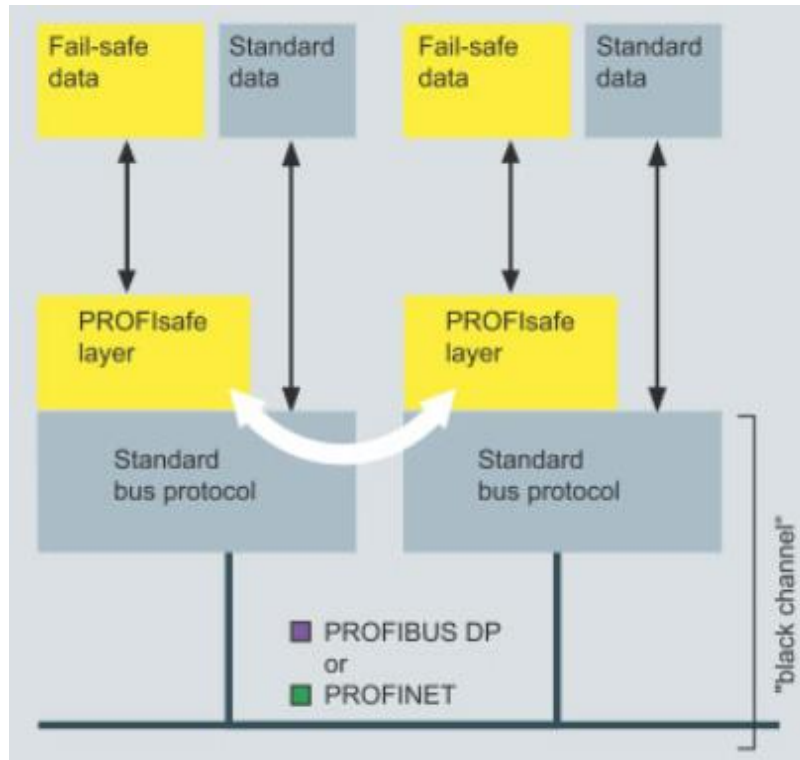


Figura 29 Arquitectura Profisafe

Se ve como la capa de seguridad trabaja sobre la capa de enlace para garantizar disponibilidad y acceso por parte de la aplicación con la cadencia de datos necesaria.

Para establecer un enlace de datos de seguridad, es necesario que ambos extremos de la comunicación sean seguros e implementen el protocolo además de que los distintos elementos de red, switches y router, sean compatibles. En el proyecto actual se establecen los siguientes tipos de enlace.

- Enlace de seguridad PLC a PLC, establecido para las comunicaciones de seguridad entre el PLC de la estación y el PLC de control de la línea.
- Enlace de seguridad Sensor a PLC, establecido entre los diferentes sensores de seguridad de que dispone el sistema, como los encoders ópticos, los detectores inductivos...y el PLC de la estación.
- Enlace de seguridad Servo Drives a PLC, en este caso la comunicación entre los controladores de los motores y el PLC es de seguridad para asegurar los tiempos de parada y la fiabilidad de las mismas.

Para establecer una comunicación de seguridad es necesario primero establecer un modo de comunicación entre los dispositivos, en este caso tenemos 2 opciones:

- iDevice, dispositivo inteligente, se establece una comunicación Profinet mediante este método.
- PN Coupler, se enlazan dos dispositivos mediante este enrutador Profinet.

Una vez establecido el modo de comunicación, se generan los canales seguros. En este caso, este tipo de canales tienen una longitud fija y además cuentan con datos de retorno para el feedback. Estos canales son de 12 bytes de entrada y 6 bytes de feedback para el caso de datos de seguridad entrantes, o 12 bytes de salida y 6 bytes de feedback para el caso de datos de seguridad salientes.

En este punto, es necesario incluir las funciones de seguridad en el programa de seguridad para hacer uso de los canales seguros y mapear sobre estas las variables que deseamos enviar/recibir de modo seguro.

Se muestran a continuación la Figura 30 Función rcv de seguridad para enviar/recibir los datos de seguridad.

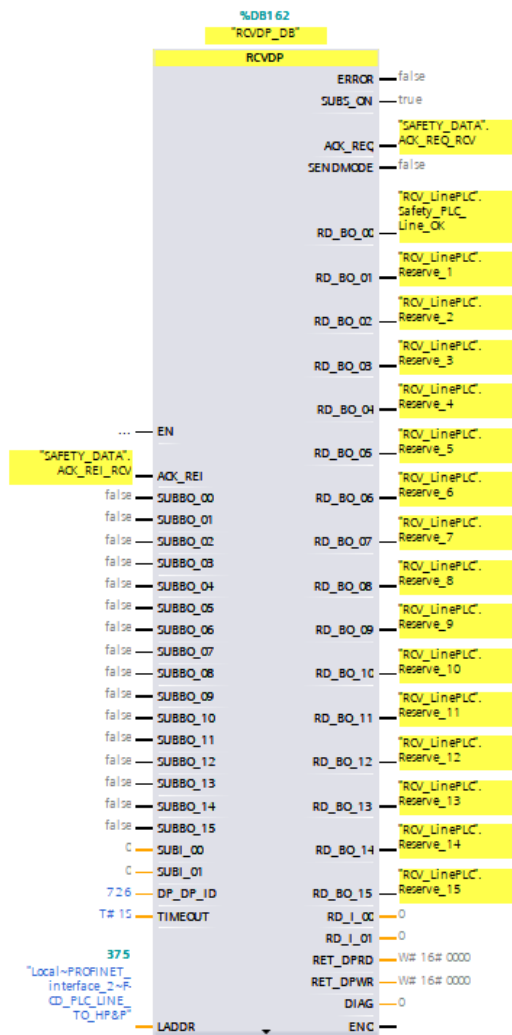


Figura 30 Función rcv de seguridad

Como se muestra en la Figura 30 Función rcv de seguridad, en la entrada LADDR se asocia el canal de seguridad creado, en la parte izquierda se mapean las entradas de seguridad. En la parte derecha se muestran los valores de sustitución, que son los que se vuelcan a las salidas siempre que haya un fallo en el canal de seguridad.

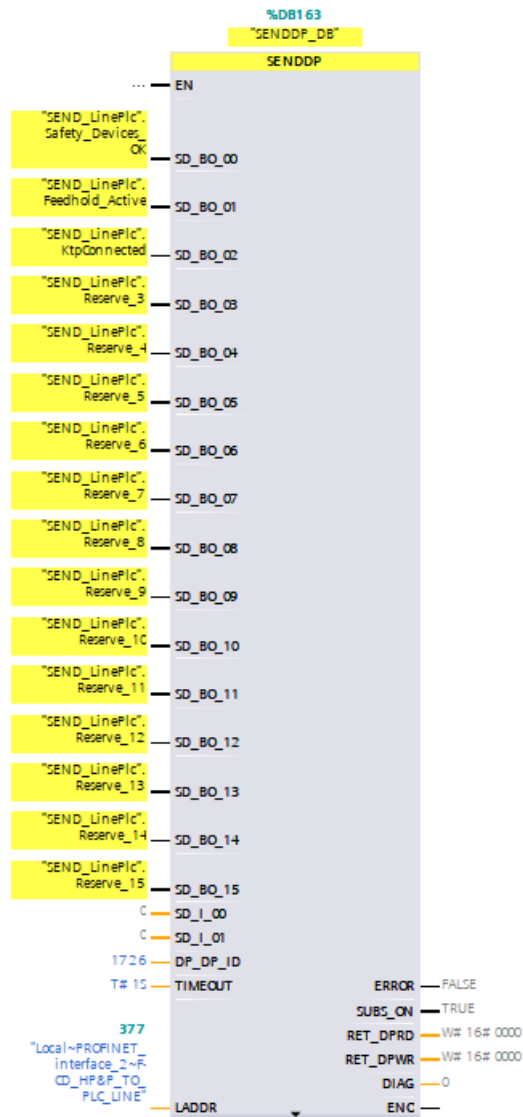


Figura 31 Función Send de seguridad

La función anterior, Figura 31 Función Send de seguridad recibe los datos de seguridad para ser enviados, al igual que la primera, tiene que tener asociado en la entrada LADDR el canal de seguridad.

4.6.4. IO Link

El protocolo IO Link (IO-Link.com) es una comunicación punto a punto que principalmente se usa para conectar sensores con el PLC. En un inicio se usaba para sustituir los antiguos enlaces analógicos entre sensores y controladores, añadiendo una cabecera digital con un ADC y una vez convertidos se transmitían como tramas de datos, con las ventajas que esto supone ya que aumentan la inmunidad al ruido, permiten mantener el cableado existente... (IO-Link.com)



Figura 32 Logo IO LINK

Actualmente se mantiene la comunicación a 3 hilos, alimentación, masa y bus de datos, la mayoría de sensores siguen este esquema. La popularidad de este protocolo ha ido en aumento e incluso para determinados actuadores se emplea también, añadiendo 2 hilos al estándar, con el fin de separar la alimentación de control y comunicaciones de la alimentación de potencia, existiendo entonces la posibilidad de trabajar a 3 o 5 hilos.

La comunicación siempre es punto a punto y se requiere de un maestro del bus, en este caso, se han estandarizado maestros que pueden controlar hasta 8 esclavos. Estos modulan a su vez todos los datos en un enlace Profinet con el que se conectan al PLC, integrando así todos los sensores.

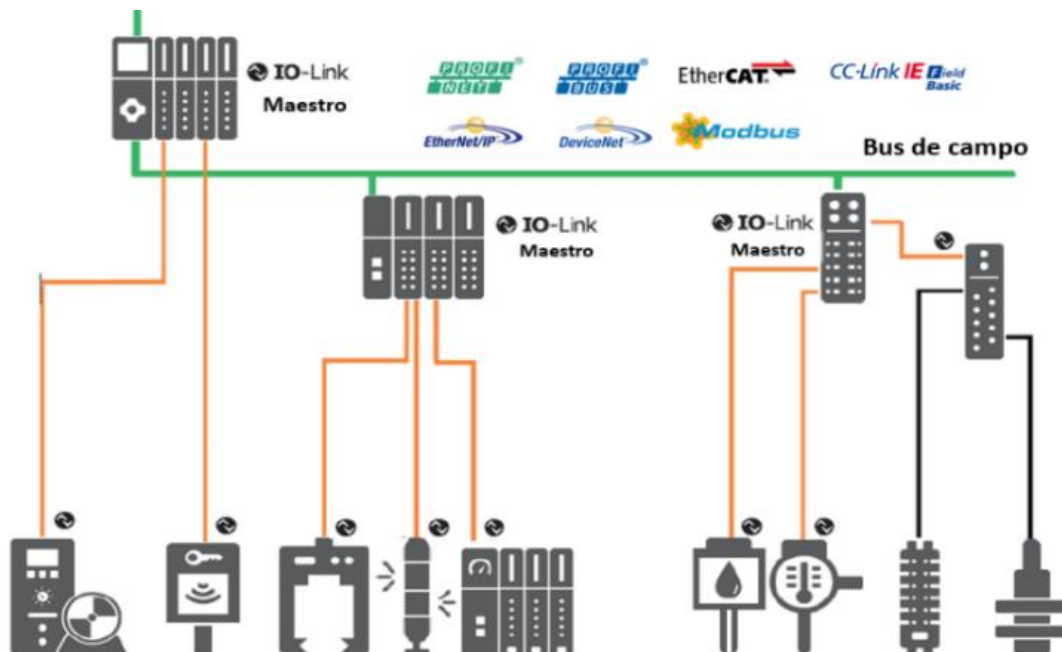


Figura 33 Arquitectura red IO link

Los dispositivos IO Link disponen de un archivo de configuración suministrado por el fabricante llamado IODD, IO link description document, un documento XML que se carga durante la puesta en marcha del maestro y de este modo se configura para recibir adecuadamente los datos del mismo.

4.6.5. OPC UA

El protocolo OPC UA (OPCFoundation.org) es un estándar para la comunicación entre máquinas que ha ido evolucionando de los antiguos OPC, unificando todas las arquitecturas disponibles hasta la fecha, y haciendo que la gestión de alarmas, conectividad y demás sea un estándar en el mundo de la automatización industrial independiente del fabricante, tecnología o equipo a integrar. (OPCFoundation.org)

El protocolo OPC UA sienta las bases de conectividad para la industria 4.0. A día de hoy, junto con MQTT, son los más usados para subir datos de máquina y procesos a la nube.

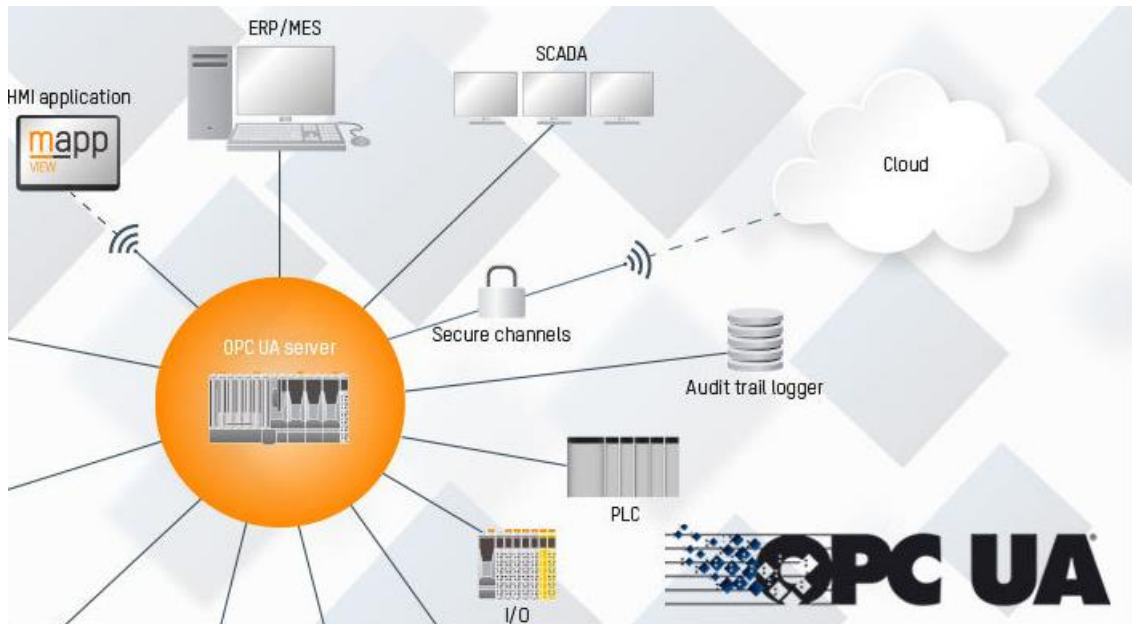


Figura 34 Logo OPC UA

Los PLC Siemens de la familia 1500 disponen de un servidor OPC UA que permite la conectividad de múltiples clientes, implementa completamente el protocolo por lo que puede trabajar con la mayoría de cifrados, servidor de alarmas, autenticación etc...

Dependiendo de la potencia del PLC el servidor puede trabajar con más o menos variables, siendo 2000 el número estándar.

El control de ejecución, sistema de supervisión y sistema MES que la estación tiene por encima hacen uso del servidor OPC UA como clientes para extraer datos de proceso y KPI's.

4.6.6 Uso de los sistemas de comunicaciones

A modo de resumen, se explica el uso de los buses de comunicaciones a continuación:

- Profinet/Profisafe: Entre el PLC, periféricas, motion drives y encoders ópticos. En estos elementos conviven telegramas de seguridad con telegramas ordinarios.
- OPC UA, entre el PLC y los elementos de la planta de orden superior, como el sistema de supervisión y el MES (manufacturing execution system).
- IO link, entre el maestro IO Link Profinet y el sensor de temperatura.

4.7. Sistema de seguridad integrada

4.7.1. Descripción

El sistema de seguridad integrada dota a la estación de seguridad de operación desde el punto de vista del operador, de modo que en todas y cada una de las circunstancias de uso de la máquina, esta se produzca siempre cumpliendo la normativa de seguridad. (Siemens, Simatic Safety - Configuring and programming)

El sistema de seguridad debe estar íntegramente formado por elementos seguros, desde los sensores, pasando por las comunicaciones y hasta el PLC deben ser elementos de seguridad y cumplir la normativa. Un elemento de seguridad es cualquier dispositivo que cumple la normativa de seguridad, dispone de doble canal de seguridad, tiene un tiempo entre fallos muy alto y tiempos de respuesta muy reducidos. Van marcados en amarillo.

Durante la fase de diseño de la estación, se analizan los riesgos y su probabilidad de ocurrencia en cada uno de los elementos de la estación y teniendo en cuenta toda la casuística. Esto se denomina performance level, PL.

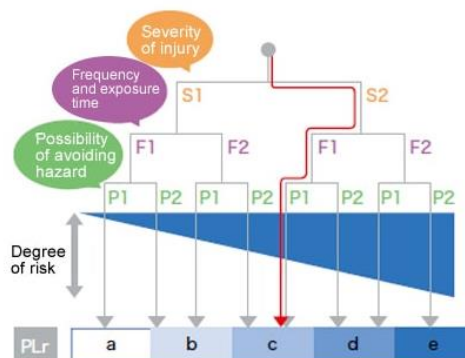


Figura 35 Calculo de Performance level

Para la obtención de un Ple, todos los elementos que conforman el sistema deben ser categoría “e”.

- Las setas de emergencia (pulsadores de seguridad, cabeza roja y base amarilla) deben ser de canal doble o Profisafe.
- Los elementos de seguridad no pueden seriarse, un elemento por cada entrada del PLC.
- El protocolo de comunicaciones debe ser de seguridad, por ejemplo, Profisafe.
- El PLC debe ser de seguridad, es decir, disponer de CPU de seguridad.

4.7.2. PLC de seguridad

El PLC de seguridad es el elemento principal del sistema Safety, se encarga de recibir el estado de las señales de seguridad, y producir una respuesta adecuada en los actuadores garantizando un tiempo de respuesta determinista.

En la actualidad, la familia de PLC's de seguridad de Siemens se denominan "Fail-Safe", e incluyen una "F" en el nombre, además de poseer una franja de color amarillo distintiva de ser un equipo de seguridad.



Figura 36 PLC S7 1500 Safety

Los PLC's de seguridad, para poder cumplir con el nivel "e", disponen de una CPU o en su defecto recursos HW dedicados para el procesamiento de las señales y lógica de seguridad.

En el caso de Siemens, se dispone de una CPU dedicada para el procesamiento de señales y lógica de seguridad. Se modela como una interrupción cíclica, que por defecto se ejecuta cada 100ms con una prioridad muy alta, lo que quiere decir que ante dos eventos concurrentes, el PLC dará prioridad al sistema de seguridad.

El PLC de seguridad dispone de recursos de memoria propios, por lo que tanto RAM como memoria Flash son dedicados para las tareas de seguridad.

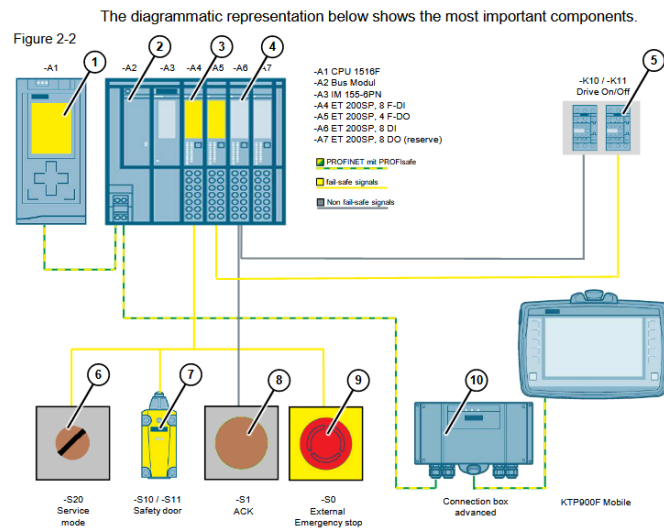
4.7.3. Entrada/Salida de seguridad

El sistema de entrada/salida de seguridad cableada se caracteriza por permitir líneas de cableado simétricas y asimétricas por elemento de seguridad. Además, estos bytes de entrada/salida son procesados directamente por el PLC de seguridad.

En Siemens, las tarjetas de entrada/salida de seguridad, se distinguen por su color amarillo, a continuación, se muestra Figura 37 Tarjeta de seguridad e Figura 38 Arquitectura de seguridad.



Figura 37 Tarjeta de seguridad



1. Fail-safe CPU
2. ET 200SP interface module
3. ET 200SP, fail-safe digital input / output modules
4. ET 200SP, standard digital input / output modules
5. Contactors for switching the robot drive on/off
6. External key-operated switch for selecting "Service mode"
7. Position switch (safety door)
8. External button for acknowledging fault messages and reintegrating the F-DI / F-DQ modules
9. External emergency stop command device
10. KTP900F Mobile Panel with connection box advanced

Figura 38 Arquitectura de seguridad

Los sistemas de seguridad cableados trabajan con señales con lógica positiva, es decir, mientras no estén pulsados o disparados los elementos de seguridad, el PLC recibe un “1” lógico por el canal correspondiente. Para una mayor robustez se suelen emplear canales alternativos (lógica diferencial), lo que implica que en una seta de emergencia, un canal este a 1 y el otro a 0 lógico en un estado y viceversa en el otro.

En los siguientes apartados se revisarán los principales elementos de seguridad de que dispone la estación pick and place.

4.7.4. Setas de emergencia

Las setas de emergencia clásicas disponen, como todos los elementos de seguridad, de doble canal electromecánico. Estas setas van cableadas a una de las entradas de seguridad en un módulo F-DI (failsafe digital input) asociado al PLC.



Figura 39 Seta de seguridad

Como se ha indicado anteriormente, las setas para un Ple no pueden ir seriadas, por lo que cada una necesitará una entrada de seguridad, tal y como se muestra en Figura 40 Conexionado seta 2 canales.

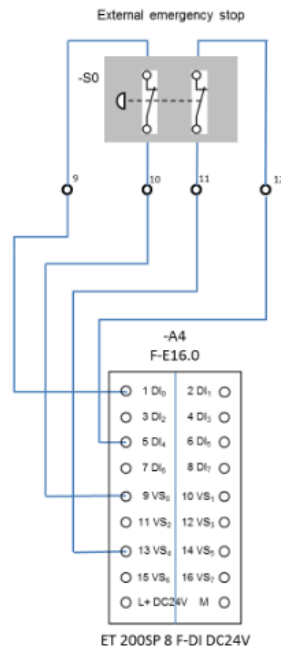


Figura 40 Conexión de seta de 2 canales

En la Figura 40 Conexión de seta de 2 canales se muestra una seta de emergencia de canal doble, alimentada a través del propio módulo de seguridad. Para una mayor robustez, las alimentaciones de la seta, son trenes de pulsos de 24V a distintas frecuencias (cientos de Hz) para que el PLC los pueda discriminar en el retorno de la seta y así analizar la integridad de cada uno de los canales.

Por aportar más detalle, tenemos las siguientes señales, correspondientes al esquema de Figura 40 Conexión de seta de 2 canales.

- Pin 9, señal VS0. Tren de pulsos de 24V de amplitud y 200Hz de frecuencia
- Pin 13, señal VS4. Tren de pulsos de 24V de amplitud y 300Hz de frecuencia
- Pin 1, señal DI0. Entrada digital de conteo de pulsos.
- Pin 5, señal DI4. Entrada digital de conteo de pulsos.

Durante la configuración de la tarjeta, se asigna una frecuencia a un canal de la seta de emergencia, y a una entrada. Se asigna la otra señal de al otro canal y a la otra entrada. El módulo de seguridad comprueba el ancho del impulso, siendo capaz de discriminar un cruce de ambas señales. En caso de apertura de los contactos por haber sido pulsada la seta, error en el cableado o cualquier otro problema eléctrico, el módulo se dispara provocando una parada segura de la estación.

4.7.5. Barreras laser

Las barreras laser son elementos de seguridad ampliamente usados en lugar de las puertas o perimetrales físicos, impiden el cruce de los operarios cuando están activas (no blanqueadas) y desarman la estación en caso de violación de su perímetro. Suelen estar formadas por arrays de lasers dispuestos en vertical en el emisor y arrays de fotodetectores dispuestos en vertical en el receptor. (Antonio Serna Ruiz, 2010)

En la Figura 41 Barrera Laser se muestra una barrera laser.

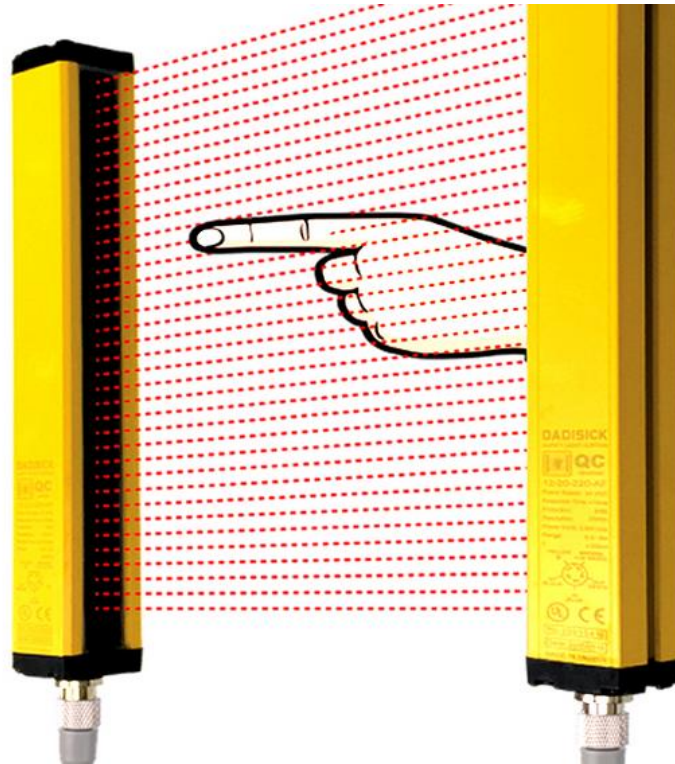


Figura 41 Barrera Laser

Las barreras laser de seguridad pueden adquirirse de doble canal, para ser cableadas, o bien de bus de campo de seguridad, Profisafe, por ejemplo. Estas barreras son empleadas en las zonas del perimetral de la estación donde hay entrada y salida de material y pieza de avión, permiten eliminar las vallas fijas y añaden versatilidad a los procesos de carga y descarga.

4.7.6. Escáner de seguridad

Al igual que las barreras de seguridad, los escáners detectan cuando una persona o cosa cruza por su área de detección. La principal diferencia es que el área de detección se puede programar, muchos de ellos además poseen memoria para varios de ellos y permiten, mediante bus de campo o señales digitales, seleccionar un modo u otro en tiempo de ejecución. (Antonio Serna Ruiz, 2010) (Areny, 2003)



Figura 42 Escáner de seguridad

En los scanners con niveles de seguridad más altos, la conmutación entre campos de detección se realiza también con señales de salida de seguridad desde el PLC, procesadas en el PLC de seguridad.

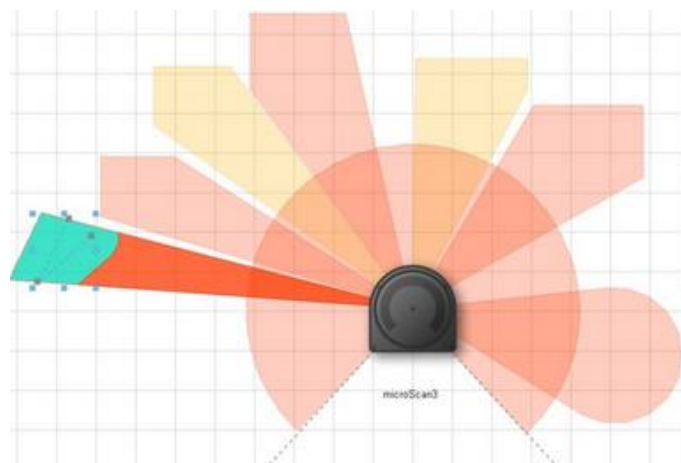


Figura 43 Áreas de seguridad

En la Figura 43 Áreas de seguridad se muestran los campos configurados para un scanner.

4.7.7. Detector de seguridad

Los detectores de seguridad son elementos imprescindibles en cualquier estación automatizada en prácticamente cualquier sector productivo. Los detectores se emplean para comprobar proximidad a algún elemento móvil o bien si están instalados en el elemento móvil para detectar un elemento estático. Con esto es posible programar las paradas o los arranques del movimiento o bien comprobar que un elemento está en posición.

Los detectores son básicamente de dos tipos:

- Inductivos, detectar una superficie metálica.
- Capacitivos, detectan cualquier tipo de superficie.

Como se ha visto en los elementos anteriores, los detectores de seguridad emplean canal doble y van conectados directamente a las entradas de seguridad del PLC. (Areny, 2003) (Antonio Serna Ruiz, 2010) (Miguel Angel Perez Garcia, 2008)



Figura 44 Sensor inductivo de seguridad

4.7.8. Cerraduras de seguridad

Las cerraduras de seguridad son elementos que se emplean para dotar a las puertas del perimetral de la estación de control de acceso, pestillo y seta de seguridad.



Figura 45 Cerradura de seguridad

Estos mecanismos pueden ir cableados en modo seguridad o bien integrarse en un bus de campo de seguridad, como Profisafe. Disponen, además, de un mecanismo de bloqueo con candado, se explicará a continuación.

Lo establecido según normativa para abrir un perimetral de modo controlado para entrar al interior a realizar tareas de proceso o troubleshooting es el siguiente:

- Se pulsa el botón amarillo, request-to-enter.
- El PLC en función del estado de movimiento o tarea del pick and place concede la apertura antes o después.
- Una vez concedida la entrada, el botón blanco se ilumina.
- Se pulsa el botón blanco para desbloquear la puerta.
- Se acciona la manilla para extraer el pestillo.
- Se abre el mecanismo del candado y el operador pone su candado personal para evitar que cualquier otro operario pueda cerrar la puerta y rearmar la estación con el dentro.
- Los tiempos de respuesta típicos de estos mecanismos son del orden los cientos de ms. La seta de emergencia va por otro canal por lo que no le afecta la electrónica de la cerradura.

Para cerrar el perimetral, el procedimiento de seguridad establece lo siguiente:

- Retirar el candado.

- Cerrar puerta y echar pestillo.
- Pulsar el botón blanco para enclavar el pestillo.
- Pulsar rearme de máquina para cancelar la petición de apertura anterior.

4.8. HMI(Human Machine Interface)

4.8.1. Descripción

Los HMI son el medio que el operador tiene para trabajar con la estación sin tener en cuenta los elementos de seguridad y rearme.

A través del HMI se controlan todas las características y tareas de la estación:

- Se tiene un sinóptico de los elementos de la estación y su estado en tiempo real
- Se pueden visualizar las alarmas y warnings actuales.
- Se puede visualizar el log de alarmas y warnings.
- Se puede ejecutar el proceso de la misma.
- Se pueden acceder a tareas de mantenimiento tales como:
 - Mover en jog
 - Referenciar un eje
 - Sincronizar ejes
 - Forzar sensores que no funcionen
 - Mover actuadores neumáticos
- Se pueden acceder a tareas de administrador tales como:
 - Edición de recetas y datos teaching
 - Posiciones geométricas de destino
 - Forzado de sensores de seguridad

4.8.2. Hardware

El hardware empleado para el HMI es una KTP de Siemens modelo 900f.



Figura 46 HMI KPT

Esta KPT 900F es un HMI de seguridad, el cual dispone de una seta de emergencia Profisafe sobre el marco y un botón deadman en la parte trasera. El deadman es un pulsador de 3 posiciones:

- Reposo, deadman no pulsado, no se puede iniciar movimiento al no haber confirmación de operario.
- Pulsado en posición 1, se puede iniciar el movimiento.
- Pulsado en posición 2, no se puede iniciar el movimiento al haber sido pulsado en exceso el botón, indicando un problema en el operador como puede ser electrocución con tetanización de los músculos del brazo

Para pasar de la posición 1 a la 2 hay que superar un tope mecánico de 1 newton aproximadamente.

Además, dispone de 12 botones físicos y ergonómicos dispuestos en ambos laterales de la pantalla.

Estas pantallas, al contrario que las que van empotradas en los armarios eléctricos, son portátiles, por lo que disponen de un cable (de diversas longitudes) y necesitan de otro elemento hardware llamado connection box, de estas se pueden instalar hasta 255. El operario puede ir cambiando de connection box para trabajar con las distintas partes de la estación y estar lo más cercano posible de los actuadores y sensores. Además, es posible saber en el PLC donde se está conectado y restringir zonas de trabajo si se está alejado de ellas y demás.

A continuación, se muestra Figura 47 HMI + Connection Box.



Figura 47 HMI + Connection Box

4.8.3. Entorno de programación

Los HMI de Siemens se programan en un lenguaje llamado WinCC. Es un lenguaje gráfico en el que los objetos están predefinidos y se pueden editar sus propiedades por parte del programador. Además, permite acceder a las funciones avanzadas mediante scripts programados en Visual Basic. (Siemens, Programming guideline for S7 1500)

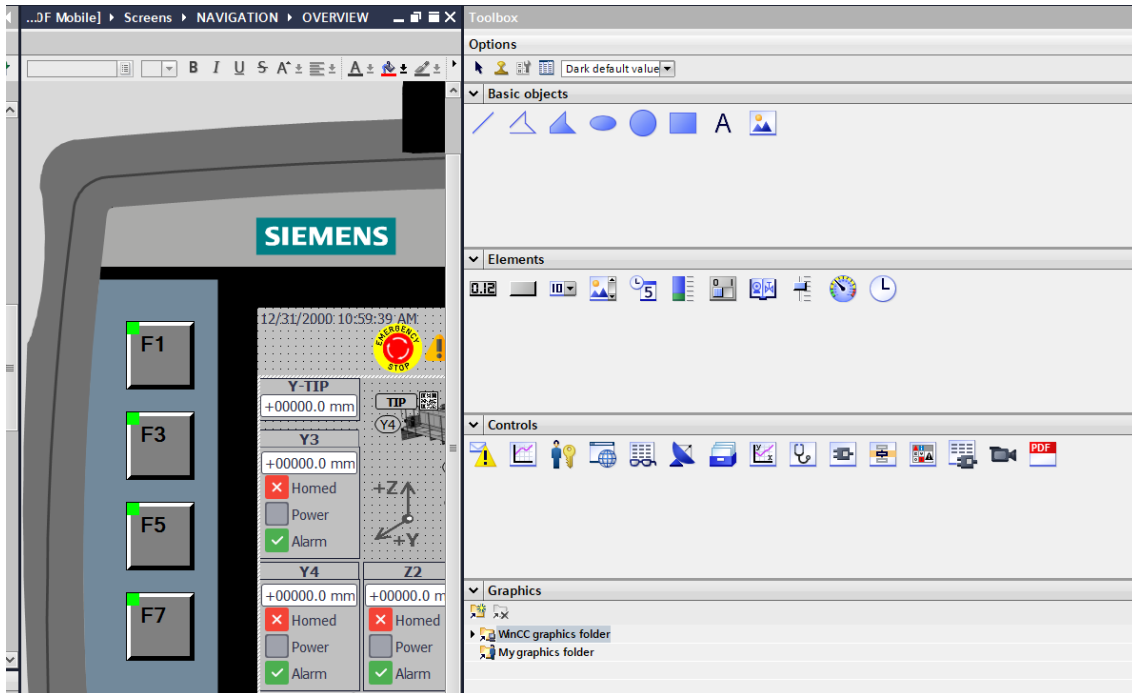


Figura 48 Entorno WinCC

Se ve en la Figura 48 Entorno WinCC como el programador dispone de un modelo virtual del HMI donde se van añadiendo objetos, en este caso los disponibles se ven a la derecha. En la Figura 49 Propiedades objeto WinCC se muestran las propiedades de un objeto cuadro de texto.

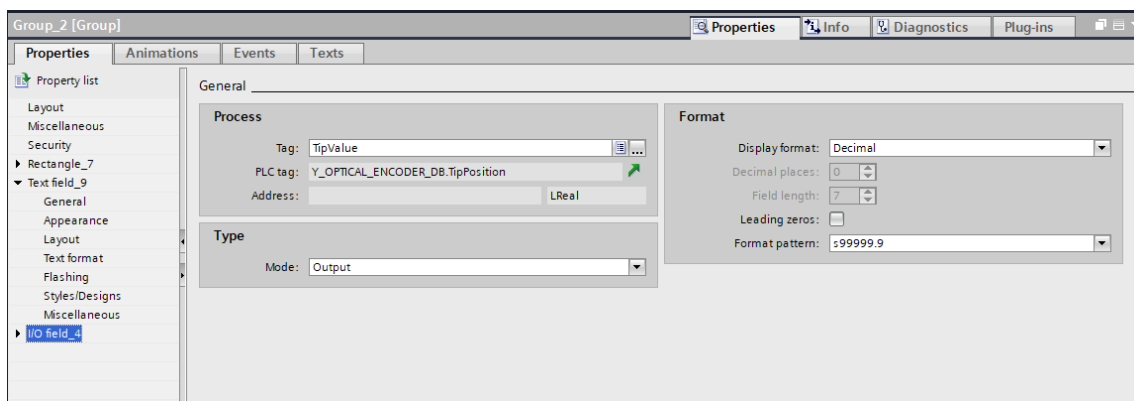
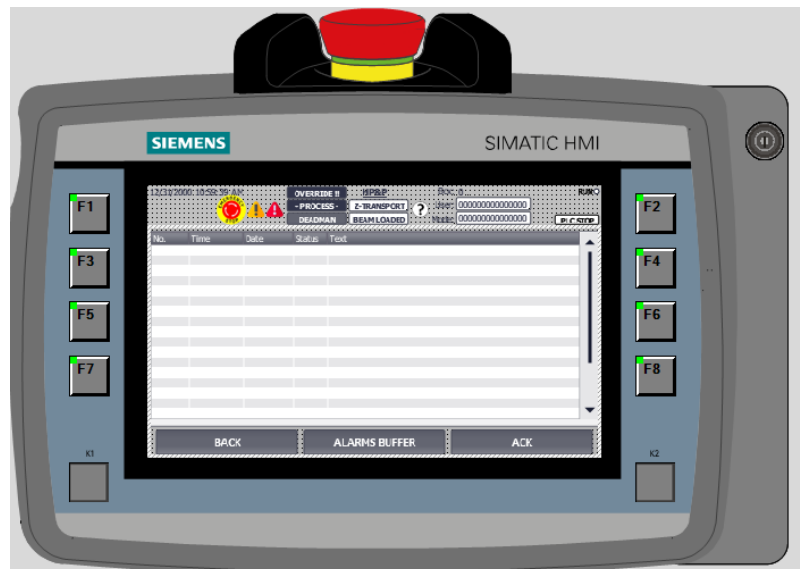
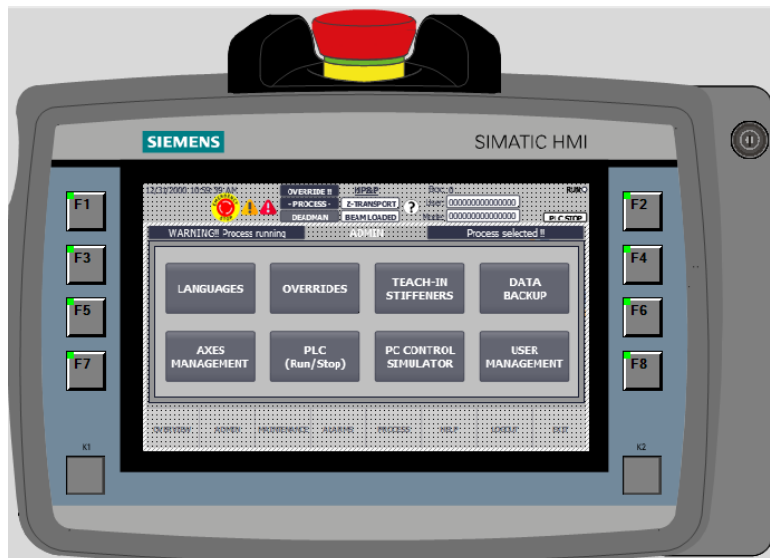
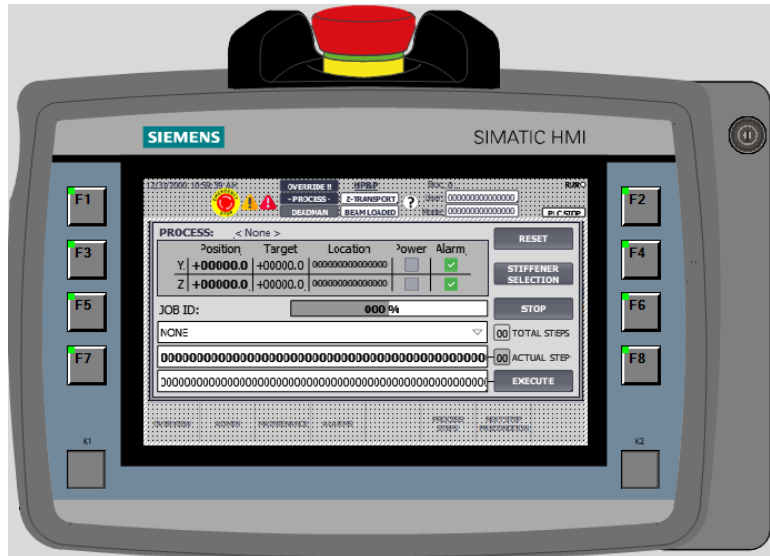


Figura 49 Propiedades objeto WinCC

4.8.4. Pantallas







4.9. Laser tracker

4.9.1. Descripción

El láser tracker es un equipo independiente que es capaz de obtener posiciones geométricas de los elementos de una estación una vez referenciado a la planta en la que está instalado. El láser tracker es de vital importancia en la estación pick and place. Desde la puesta en marcha, donde es empleado por los montadores para ajustar los elementos estructurales y de precisión que conforman la estación hasta la fase de operación y fase de mantenimiento donde se usa para comprobar con rutinas automáticas que el posicionamiento del equipo en las zonas de trabajo está dentro de la geometría de la estación.

A continuación, se muestra la Figura 50 Laser en trípode .



Figura 50 Laser en trípode

El láser tracker basa su funcionamiento en la medida de la distancia al objetivo, que es llamado reflector, es una esfera con 3 planos de cristal ortogonales. Con esta distancia y los dos ángulos de su haz laser, azimut y elevación, sitúa el punto donde se encuentra el reflector en el espacio.

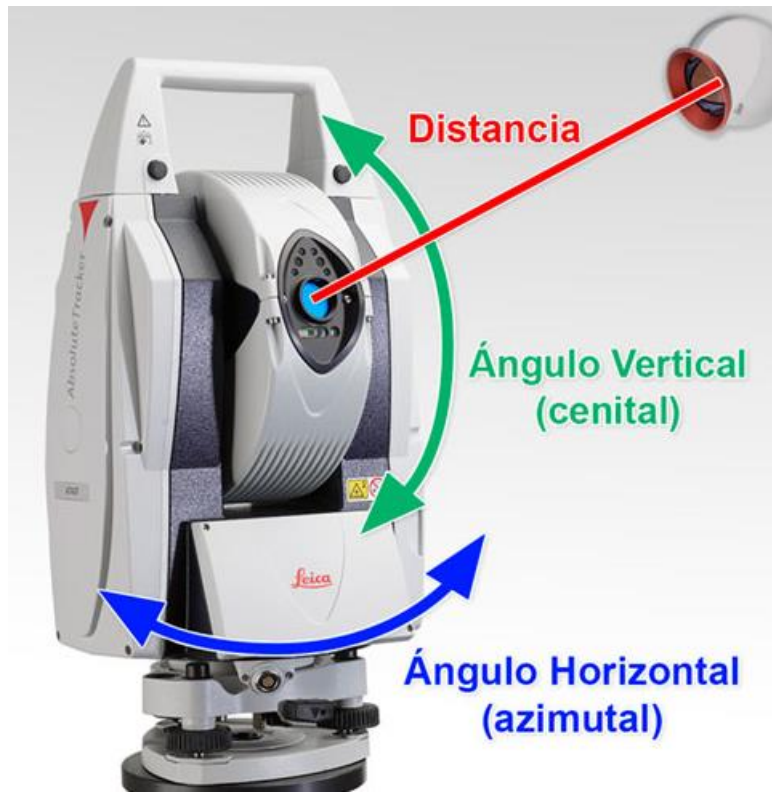


Figura 51 Cabezal laser tracker

Como su nombre indica, el cabezal es servo-actuado, y es capaz de seguir al reflector si se hacen movimientos suaves y lentos, de este modo puede además grabar trayectorias, en el caso de usarse en robótica, por ejemplo. El láser tracker es necesario situarlo en un lugar en el que tenga visibilidad con todos los puntos con los que tiene que trabajar.

En una estación que va a ser medida con láser tracker, la ingeniería de diseño mecánico ha tenido que dejar puntos de referencia denominados mrp (measure reference point), los cuales presentan un acabado superficial con una tolerancia muy baja, y es donde van situados los reflectores.



Figura 52 Reflectores Laser tracker

4.9.2. Integración

Las unidades laser tracker son equipos independientes que disponen de su propio SW de control y suelen trabajar durante las puestas en marcha de las estaciones.

En determinadas ocasiones, cuando se trabaja con elementos de precisión en grandes estaciones, es necesario dejar integrado el Laser tracker con la estación con el fin de garantizar el posicionamiento tras muchos ciclos de trabajo. En nuestro caso, una unidad Laser tracker quedo instalada sobre una torreta desde donde es capaz de visualizar todas las posiciones de trabajo. El principal problema es que los elementos mecánicos se acaban desajustando y desgastando con el paso de los ciclos, y suelen perder décimas de precisión en el posicionamiento a lo largo de los años. Por ello, el sistema laser tracker se encarga de ir corrigiendo estas derivas en los valores de las coordenadas de cada estación, por ejemplo, la estación 1 tenía una coordenada de trabajo x de 25550 mm, tras varios ciclos, el tracker detecta que el gantry se está posicionando en 25555 mm aunque en el PLC el valor es correcto ya que no tiene manera de sensar este error. Es entonces cuando el tracker "informa" al PLC de error, añadiendo este último un offset de 5mm desde ese momento para corregir el posicionamiento.

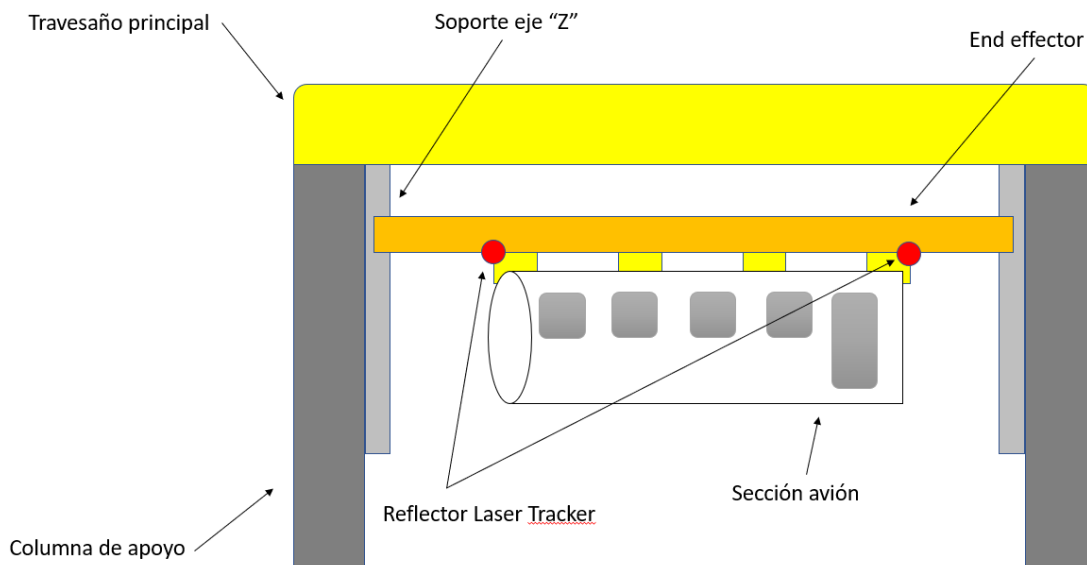


Figura 53 Posición reflectores Laser

Para la integración del equipo, se hace uso de su servidor OPC UA, el PLC se conecta a este último como cliente y accede en tiempo real a las posiciones X, Y, Z de los puntos medidos. El láser tracker no forma parte del lazo de posicionamiento, solo sirve datos de referencia en las paradas del pick and place para que el PLC las compare con los valores teóricos de su lazo de posicionamiento. El Laser tracker tiene unos tiempos de respuesta lentos ya que para obtener el punto (coordenadas x, y, z) en su máxima precisión, 5 centésimas de milímetro, necesita que el mrp esté totalmente estático.

En la programación actual del sistema, cada 20 ciclos de proceso, el PLC comprueba el posicionamiento con el Laser tracker, analizando la deriva con el valor del lazo de posicionamiento y generando alarmas o Warnings dependiendo del valor absoluto del error para

que un super usuario decida qué hacer. En los casos en los que haya deriva, se vuelve a referenciar el equipo.

Conviene mencionar, que los valores de posicionamiento son compensados tanto por el PLC como por el láser tracker con la temperatura de la sala. En este caso el PLC dispone de un sensor de temperatura del que se hablará más adelante.

4.10. Encoder óptico para lazo de control de posicionamiento

4.10.1. Descripción

El encoder óptico es el encargado de sensorizar la posición real de la cadena cinemática para cerrar el lazo de posicionamiento. Este corregirá la posición de los servomotores a fin de corregir el posible error de posicionamiento generado por el lazo de posición cerrado con los encoders integrados en el servo.

Este encoder está basado en una cámara que lee código data matrix. El encoder se mueve solidario al final de la cadena cinemática del eje a controlar con el fin de corregir errores de posicionamiento debido a backlash de los engranajes, deformaciones de eslabones, errores de geometría de la estación etc. Las características de la cámara se exponen en las siguientes páginas.

A diferencia del encoder lineal del eje Z, estas cámaras no cierran el lazo de posicionamiento, sino que llaman a un algoritmo que corrige la posición tras alcanzarla por el lazo de posición principal. En otras palabras, cerrarían un lazo de posicionamiento secundario y de mucha menos dinámica.

El código data matrix está impreso en una cinta que se fija a lo largo del eje lineal a recorrer.

En este caso se trabaja con un equipo de la casa alemana Pepper and Fuchs. (Fuchs)

En la Figura 54 Características encoder óptico se muestra el equipo y principales características:



Figura 54 Características encoder óptico

El encoder dispone de interfaz Profinet/Profisafe para integrarse adecuadamente en la arquitectura de control del PLC.

A continuación, se muestra la Figura 55 Código encoder acotada del código compatible con este lector.



Figura 55 Código encoder

Se instalarán dos encoders ópticos, uno en cada lado del guiado X con el fin de evitar que ambos extremos del pórtico se crucen durante su desplazamiento.

4.10.2. Arquitectura hardware

A continuación, se muestra la Figura 56 Arquitectura HW encoder.

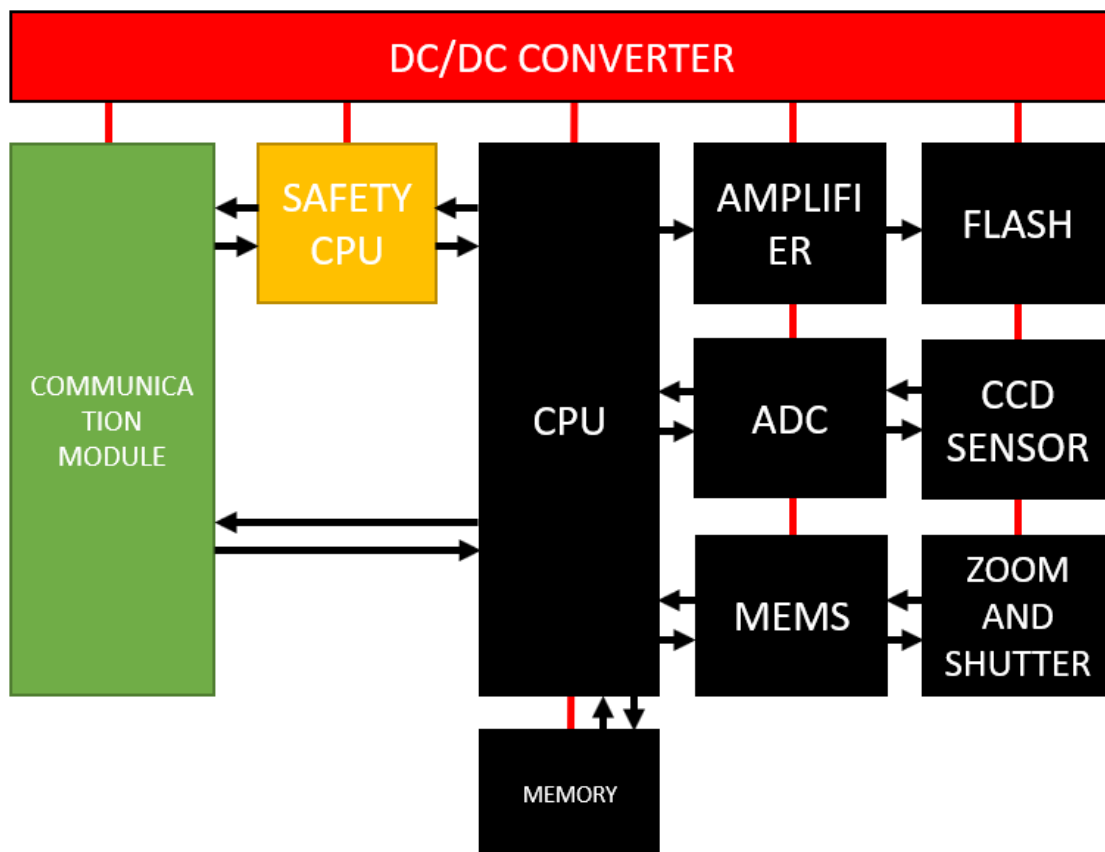


Figura 56 Arquitectura HW encoder

La CPU está basada en arquitectura ARM de 32 bits. Dispone de un procesador de seguridad dedicado que dispone de un bus dedicado para acceso directo al módulo de

comunicaciones y otro para comunicación con la CPU principal del encoder. La CPU trabaja a una frecuencia de reloj de 600 MHz y tiene una potencia de cálculo de hasta 4800 MIPS.

El encoder dispone de varios periféricos para controlar la operativa del sistema:

- Flash. El flash es necesario para generar las condiciones de iluminación adecuadas para la captura de imágenes, de este modo el encoder puede funcionar incluso en condiciones de oscuridad total. Está basado en diodos LED de luz blanca y está en funcionamiento desde el momento en el que el encoder se enciende. Dispone de un driver (amplificador) para su control.
- CCD (charge coupled device). Este sensor es el encargado de capturar las imágenes. Dispone de filtro RGB ya que las imágenes son tomadas en color debido a que la información de los códigos datamatrix de seguridad está contenida en tonos amarillos, azules y blancos y negros de alto contraste.
- Sistema Zoom and shutter. Controlado por un Sistema MEMS, permite mover las lentes y manipular el obturador con el fin de adaptarse a las diferentes condiciones de iluminación, distancias focales y velocidad de movimiento del encoder respecto del código.

4.10.3. Características principales

En este apartado se listarán las principales características técnicas del equipo.

- Velocidad máxima del encoder: 8 m/s
- Máxima longitud de medición (longitud de cinta que es capaz de seguir): 100000 m
- Flash: Led integrado rojo y azul.
- Distancia máxima a cinta: 100 mm
- Apertura de visión: 120x80 mm
- Máxima luz externa: 30000 lux
- Precisión de lectura: 0.2 mm
- CPU: ARM a 600 MHz y 4800 MIPS
- Nivel prestacional de seguridad: PL e
- Tiempo de respuesta seguridad: 165 ms
- Sistema eléctrico: 24 V / 6 W
- Comunicaciones: Profinet/Profisafe 100Mbit/s
- Diagnóstico: 7 Led
- Dimensiones: 70x70x50 mm
- Material: Plástico ABS
- Peso: 200 g

Para conseguir una precisión de posicionamiento de 0.2mm, la posición de la cámara respecto del código debe permitir la lectura de varias etiquetas al mismo tiempo además de respetar la distancia cámara código dentro de una tolerancia en toda la carrera del

equipo. En este escenario, la cámara es capaz de leer varios códigos en su campo de visión, por tanto, al ir moviéndose respecto de su campo de visión estos códigos, por el movimiento relativo de la cámara, esta es capaz, por comparación de calcular posición y velocidad de la misma.

Con el fin de garantizar la lectura en modo seguro, el fabricante ha creado un diagrama que muestra la situación del código respecto de la cámara a tal fin.

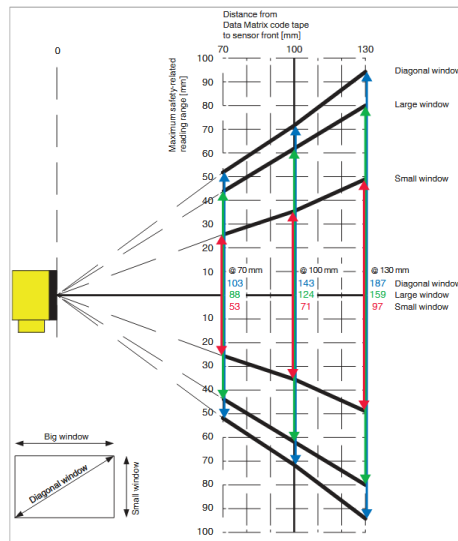


Figura 57 Ángulos de lectura

Por otro lado, en la Figura 58 Ángulos de lectura 2, se ve la tolerancia de lectura del código ante desviaciones angulares en los ejes.

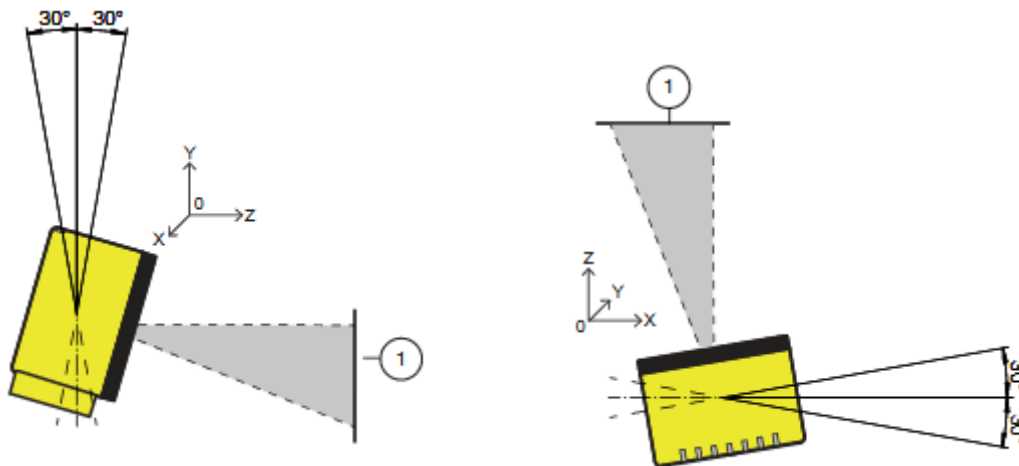


Figura 58 Ángulos de lectura 2

4.10.4. Comunicaciones

4.10.4.1. Protocolo

El equipo implementa el protocolo Profinet y Profisafe. Este equipo forma parte de los elementos de seguridad de la estación Pick and Place, por lo que es imprescindible la compatibilidad con redes Profisafe. Se integra en redes Profinet de hasta 100Mbit/s. Como esclavo Profisafe es compatible con el modo IRT, con lo que es capaz de ser esclavo del dominio síncrono del PLC. Su actualización de datos de seguridad se produce, como máximo cada 165 ms.

4.10.4.2. Salida de datos

El equipo brinda al IO Controller (PLC) varios telegramas de salida con los que se envían los datos más relevantes para el control del sistema. Estos telegramas son comunicaciones no seguras.

- Telegrama 1: 4 bytes de datos en los que se envía la posición de un modo no seguro en la que se encuentra la cámara con una resolución de 0.1 mm.
- Telegrama 2: 2 bytes de datos en los que se envía la velocidad de movimiento del encoder.
- Telegrama 3: 2 bytes de datos en los que se envía el status del encoder.
- Telegrama 4: 2 bytes de datos en los que se envían errores y warnings. La siguiente tabla muestra los warnings que puede generar el equipo.

Warning Data Set

Number	Warning
WRN01	Code with non-PXV content found
WRN02	Reader too close to code tape
WRN03	Reader too far from code tape
WRN04	Y position too large; The sensor is just before OUT
WRN05	Y position too small; The sensor is just before OUT
WRN06	The reader is rotated or tilted in relation to the code tape
WRN07	Low level of code contrast
WRN08	Repair tape detected
WRN09	Temperature too high
WRN10 ... WRN16	Reserved

Figura 59 Mapa de datos Encoder óptico

En cuanto a comunicaciones de seguridad, el equipo envía los siguientes telegramas:

- Telegrama 1: 6 bytes de datos en los que se envía la posición con códigos CRC para asegurar la integridad de los datos.
- Telegrama 2: 6 bytes de datos en los que se envía el status con códigos CRC para asegurar la integridad de los datos.

4.10.5. Integración en arquitectura HW del sistema

El encoder óptico se integra a nivel HW como un esclavo Profinet/Profisafe del PLC de la estación. Como se ha visto en el apartado anterior, envía datos de posicionamiento en tiempo real tanto por canales no seguros como por canales seguros.

En la Figura 60 Arquitectura de red, se muestra un extracto de la arquitectura de red mostrada en el primer apartado.

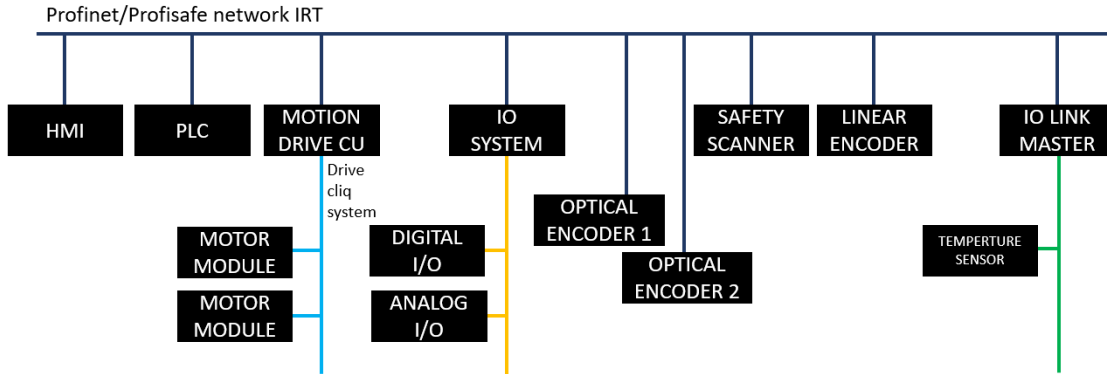


Figura 60 Arquitectura de red

Para su integración a nivel HW, es necesario asignar una dirección IP de la intranet de la estación y un nombre Profinet. También es necesario indicar los telegramas de datos en que direcciones de entrada irán asignados para que puedan ser direccionados por el PLC para su uso en el programa de usuario.

Encoder 1	IP	172.16.20.10
Encoder 2	IP	172.16.20.20
Encoder 1	Profinet name	Opt_Enc_1_PP
Encoder 2	Profinet name	Opt_Enc_2_PP

Encoder 1	Telegrama 1	Posición	I1000
Encoder 1	Telegrama 2	Velocidad	I1003
Encoder 1	Telegrama 3	Status	I1005
Encoder 1	Telegrama 4	Warnings	I1007
Encoder 2	Telegrama 1	Posición	I1010
Encoder 2	Telegrama 2	Velocidad	I1013
Encoder 2	Telegrama 3	Status	I1015
Encoder 2	Telegrama 4	Warnings	I1017

4.10.6. Integración en arquitectura SW del sistema

Los encoders ópticos se integran a nivel de arquitectura SW en los bloques de función donde se cierra el lazo de posicionamiento.

La palabra de estado de los encoders se procesa en los bloques de función donde se gestiona el estado operativo de la máquina y sus elementos. La velocidad no se emplea ya que es más fiable usar la calculada por el drive s120. Por su parte, los warnings se integran en los bloques de función que gestionan la generación de alarmas y reportes de estación.

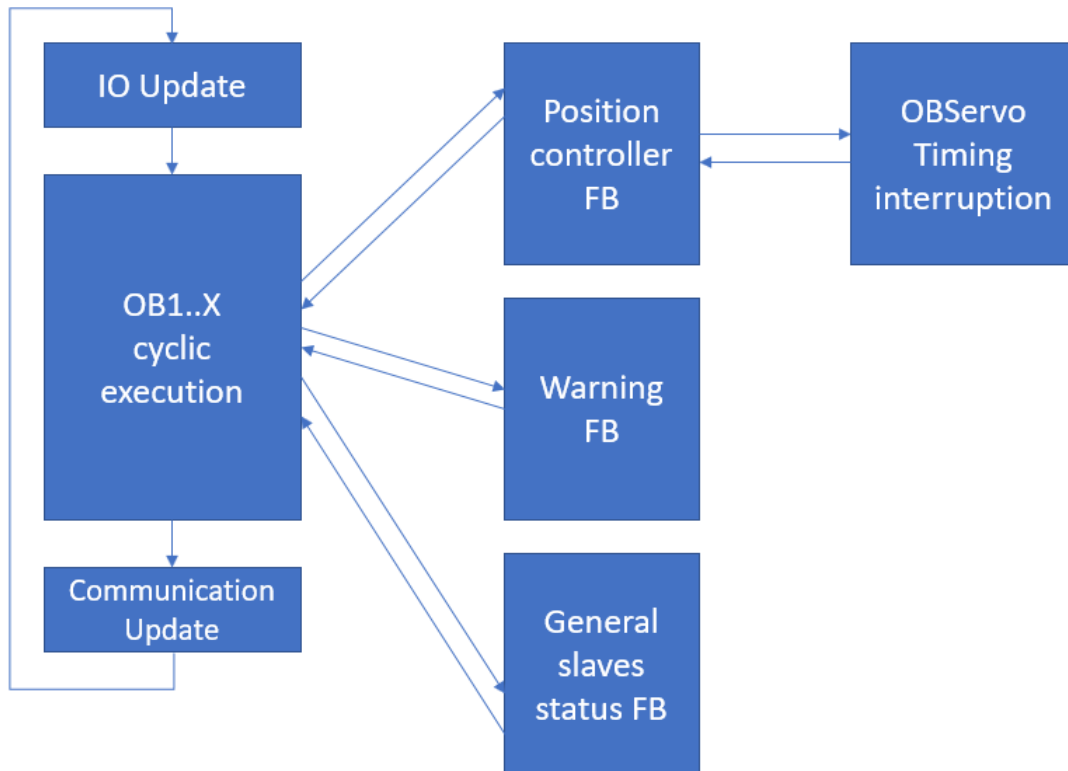


Figura 61 Estructura de llamadas PLC

Cada ciclo de scan del PLC, se toma un valor de la posición de cada encoder, estos se usan en la llamada del OB cíclico a la función de lazo de posicionamiento secundario, "position FB controller", tras el procesado de esta función, se actualiza el valor actual de posicionamiento de cada servo del eje Y.

En la Figura 62 Algoritmo lazo secundario, se muestra el diagrama de flujo que describe el funcionamiento del lazo de posición secundario.

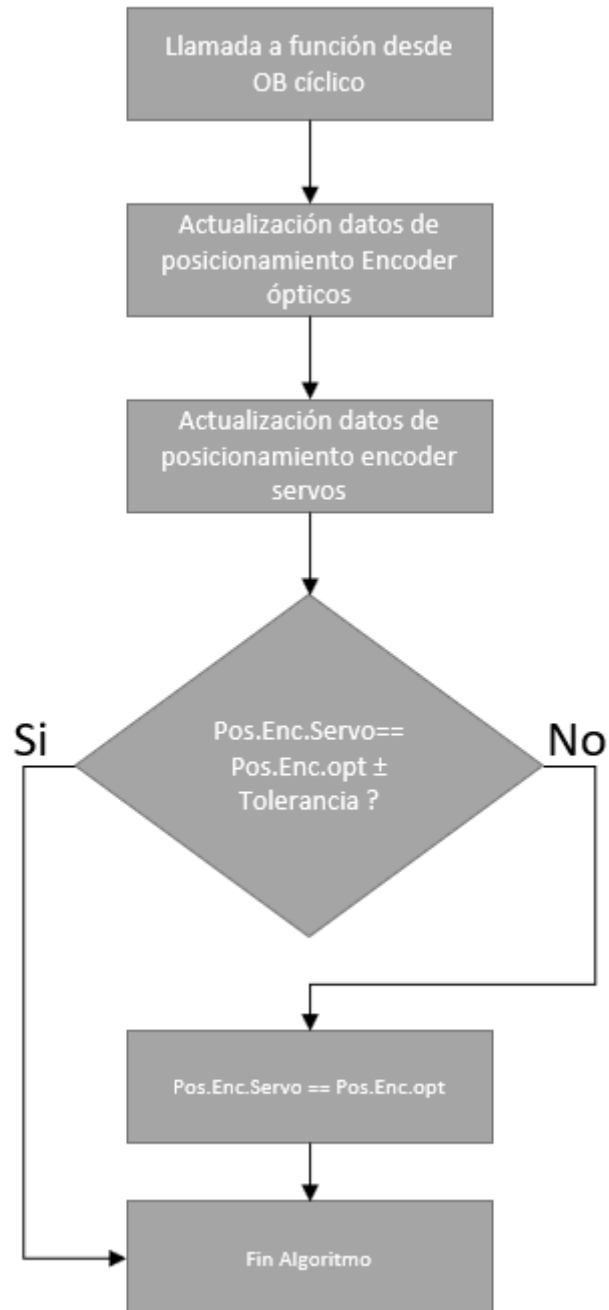


Figura 62 Algoritmo lazo secundario

Básicamente se compara la posición que nos devuelven los encoders ópticos con la del encoder acoplado mecánicamente al eje del servo. Si son distintas teniendo en cuenta la ventana de tolerancia admitida, se re-referencian los servomotores en tiempo real a la posición indicada por los encoders ópticos.

4.11. Encoder rotativo

4.11.1. Descripción

Los encoders rotativos se encargan de entregar una señal de posicionamiento y velocidad en tiempo real al drive de control del servo. Estos encoders van acoplados mecánicamente al eje del servomotor, y constituyen el primer elemento de realimentación de que disponen los lazos de control para la regulación de los lazos de velocidad y posicionamiento.

4.11.2. Arquitectura

Los encoder rotativos son elementos usados desde hace muchos años para el control de motores eléctricos, principalmente servomotores. Su arquitectura ha ido avanzando con la tecnología, en la misma medida que ha aumentado su desempeño. A continuación, se hará una descripción constructiva para luego entrar a describir su arquitectura hardware.

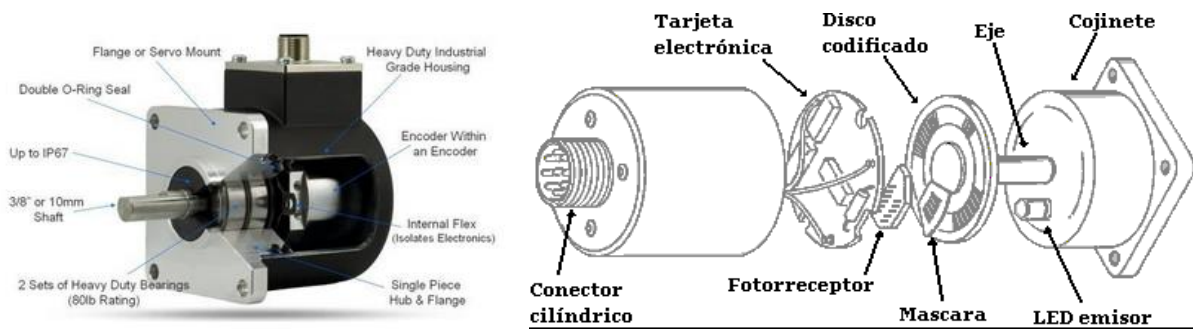


Figura 63 Encoder rotativo

Como se muestra en la Figura 63 Encoder rotativo, el encoder está formado por una carcasa cilíndrica, hecha de metal para aislarlo electromagnéticamente, dentro de la que se disponen el resto de elementos. Estos elementos son, principalmente, la placa electrónica de emisores, el disco codificado, y la placa de foto-receptores. Se muestra una imagen de detalle en la Figura 64 Muestras Encoder. (<https://www.researchgate.net/>)

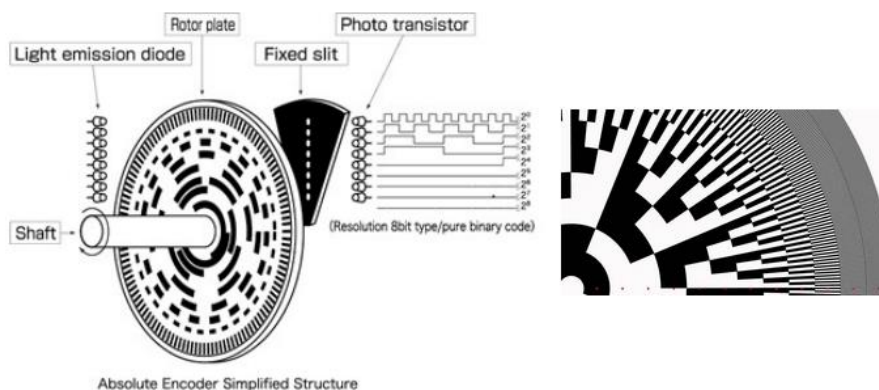


Figura 64 Muestras Encoder

Existirá un led, o haz de luz, por cada pista de codificación, que además coincidirán con el número de bits del encoder. Asimismo, existirá un foto-receptor por pista codificada.

Atendiendo a la codificación, existen dos tipos de encoders principalmente, los incrementales y los absolutos. Los encoders incrementales no codifican cada posición angular, sino que envían un pulso cada muesca de disco perforado, con lo que tras un reinicio del controlador es necesario una referenciación mecánica del eje asociado al encoder para iniciar la cuenta de nuevo. Por su parte, los encoders absolutos, cada posición angular (dentro de su resolución), tiene una codificación única, por lo que el sistema es capaz de conocer su posición exacta tras un reinicio del equipo. Los encoders incrementales, permiten una mayor resolución.

Actualmente, la estrategia seguida por los fabricantes es la de emplear encoders con pistas incrementales y añadir sistemas electrónicos retentivos tales como memorias ROM, con el fin de almacenar el valor de la posición de modo retentivo sin necesidad de codificación unívoca por posición angular. Esto permite disponer de encoders absolutos con resoluciones típicas de encoders incrementales.

Algunos tipos de encoders absolutos disponen de tecnología multivuelta, esto hace que, dentro de una misma vuelta, se emplean sistemas incrementales con almacenamiento en ROM, y para el almacenamiento de la vuelta en la que se encuentra el sistema usan un modo de codificación absoluto. (Creus, 2011) (Adel S. Sedra, 2006) (Antonio Serna Ruiz, 2010)

A continuación, se muestra la Figura 65 Arquitectura HW encoder.

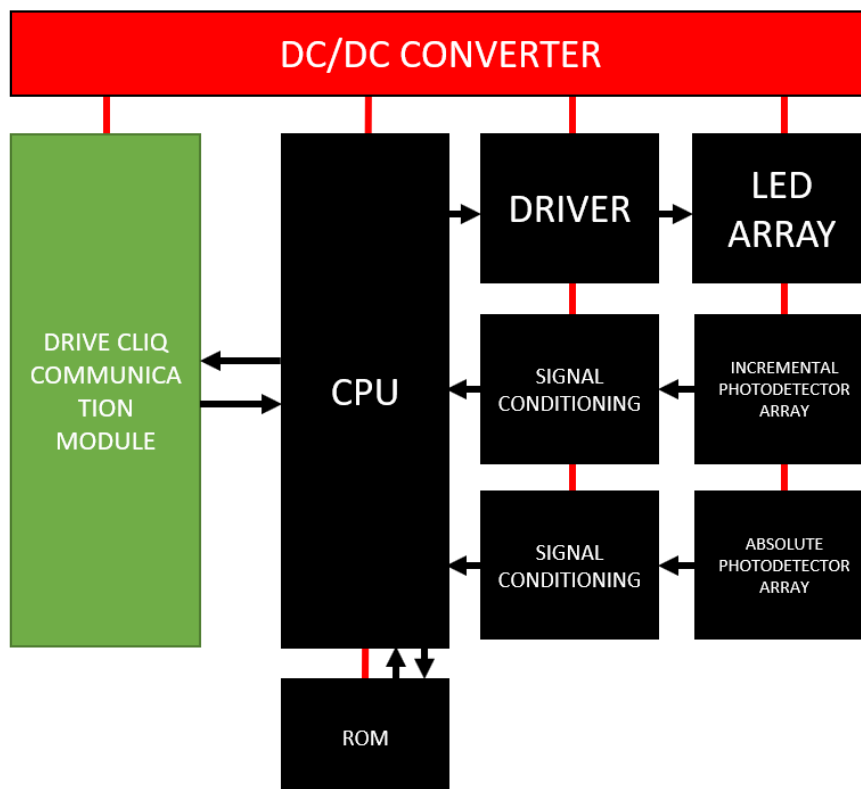


Figura 65 Arquitectura HW encoder

4.11.3. Características

Las principales características de estos tipos de encoder son las siguientes:

- Resolución: 24 Bits
- Pulsos de encoder por vuelta: 16777216 pulsos/revolución
- Pulsos por grado: 46603 pulsos
- Posición absoluta: 12 bits
- Vueltas en posición absoluta: 4096 vueltas
- Interfaz de salida: Drive Cliq

4.11.4. Comunicaciones

4.11.4.1. *Protocolo de salida*

Los primeros encoders presentaban una salida basada en tren de pulsos de frecuencia determinada por la velocidad de rotación del eje. Para la decodificación del sentido de giro se emplean dos señales de salida de pulsos desfasadas 90º eléctricos.

En el caso de los encoders actuales, el interfaz principal sigue siendo dos salidas de trenes de pulsos desfasadas 90º pero se transforma en un valor numérico que es enviado actualizado en cada ciclo de comunicaciones con el PLC.

En el caso de encoders drive cliq, como es este caso, el drive lee los trenes de pulsos y hace de interfaz a través de Profinet con el PLC, este último recibe las tramas Profinet síncronas con los valores del encoder actualizado para cerrar el lazo de posicionamiento.

4.11.5. Integración en arquitectura SW del sistema

El encoder interno de los servomotores está integrado por defecto al configurar el drive y hacer la puesta en marcha, no es necesario realizar programación ni tareas adicionales.

4.12. Células de carga

4.12.1. Descripción

Las células de carga se encargan de medir la carga mecánica que es soportada por los elementos portantes. Las células de carga se sitúan sobre la eslinga que porta los actuadores de cogida, de modo que el peso de la sección y de la eslinga recaer sobre ellas.

A continuación, se muestra la Figura 66 Célula de carga.



Figura 66 Célula de carga

El sistema dispone de dos células de carga como la anterior, de 1 tonelada de fondo de escala cada una.

Las principales características de la célula de carga son las siguientes:

- Máxima carga: 1 Tonelada
- Repetitividad: 0.01% (referido al fondo de escala)
- Coeficiente de temperatura: 0.004% (referido al fondo de escala)
- Tensión de alimentación: 24 V
- Resistencia de entrada: 1000 Ω
- Resistencia de salida: 1200 Ω
- Sensibilidad: 1mv/V

(Creus, 2011)

4.12.2. Arquitectura

La célula de carga está compuesta por una galga extensiométrica, esta varía su resistencia eléctrica en función de la deformación mecánica a la que es sometida. La resistencia que representa la galga extensométrica se sitúa en un **puente de Wheastone**, en ambas ramas, y la salida de este ataca a un amplificador de instrumentación, el cual modela una salida de 0 a 10V dependiendo del esfuerzo mecánico al que este sometida la célula. (Adel S. Sedra, 2006)

Conviene mencionar que el sistema está formado por la célula de carga y el módulo de la electrónica es un equipo independiente. Además, este sistema no es de seguridad.

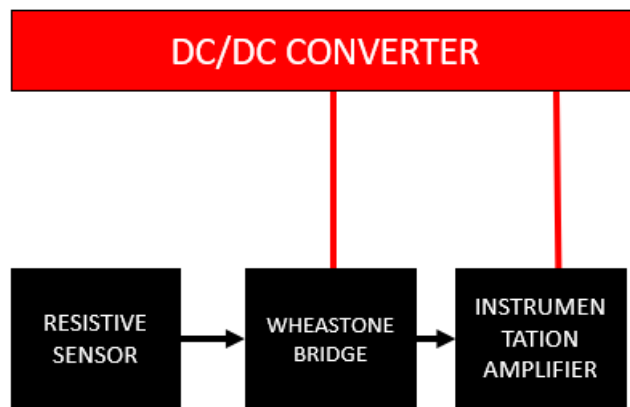


Figura 67 Arquitectura célula de carga

4.12.3. Comunicaciones

Las células de carga proporcionan una salida analógica de tensión variable, 0-10V, y por tanto van cableadas hasta los módulos de entradas analógicas del PLC. En el PLC se procesan en durante el ciclo de Scan ordinario.

4.12.4. Integración en arquitectura SW del sistema

Como se ha mencionado anteriormente, la señal de las células de carga se procesa en el PLC ordinario, su función es llamada desde el OB1. Esta función realiza las siguientes tareas:

- Comprueban si en la operación del pick and place lleva carga.
- Comprueban la masa de la sección a transportar.
- Evitan dañar la sección al cogerla de la estación si existiese un problema en los sistemas de fijación de la estación de trabajo con la sección.
- Evitan dañar la sección al dejarla en las estaciones de trabajo.
- Comprueba desequilibrios del centro de masas de la sección durante el transporte en X y Z.

Todas las comprobaciones anteriores se hacen en segundo plano y generan alarmas y warnings en la estación pick and place en caso de ocurrir.

4.13. Sensor inductivo detección de posición actuadores End effector

4.13.1. Descripción

Los sensores inductivos son ampliamente usados en la industria como elementos de detección de superficies, como feedback de posicionadores, como final de carrera para cilindros neumáticos, etc...

El principio de funcionamiento del sensor inductivo se ilustra en la siguiente imagen. (technologies)

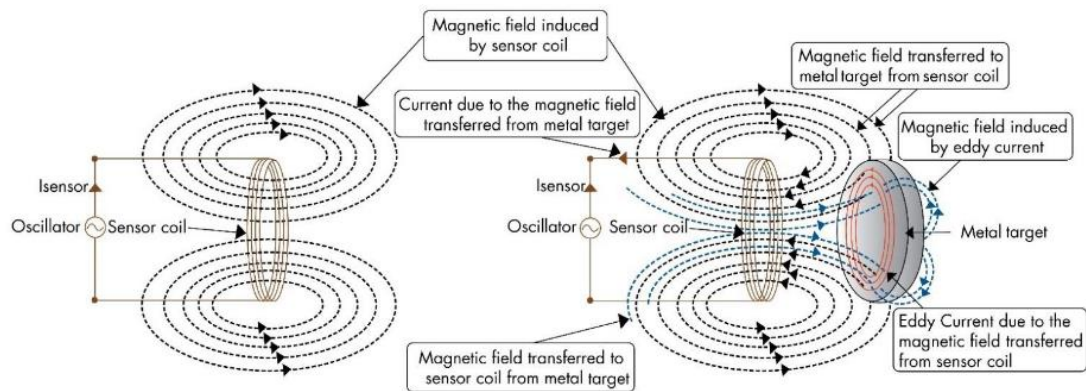


Figura 68 Funcionamiento detector inductivo

Como se muestra en la Figura 68 Funcionamiento detector inductivo, se genera una señal de tensión alterna que ataca a la bobina de campo, y esta genera un campo magnético proporcional a las espiras y a la corriente que circula por ellas. Cuando se acerca un objeto de metal, el campo magnético generado induce corrientes en el metal, que a su vez generan otro campo magnético opuesto al anterior, siendo este detectado por el módulo electrónico. (Areny, 2003) (Creus, 2011)

En el proyecto pick and place los sensores inductivos se emplean en el end effector, en la detección de la posición de forma segura de los actuadores que se encarga de coger las secciones de avión. Estos actuadores, sin entrar en detalle, giran 90° para coger la sección a través de unos interfaces colocados manualmente, y vuelven a la posición inicial para dejar la sección en las estaciones correspondientes.

Cada uno de los actuadores, 4 en total, dispone de 2 detectores de seguridad, uno por cada posición de trabajo.

A continuación, se muestra la Figura 69 Detector inductivo, , Sick IN4000.



Figura 69 Detector inductivo

4.13.2. Arquitectura

El detector inductivo presenta la siguiente arquitectura interna.

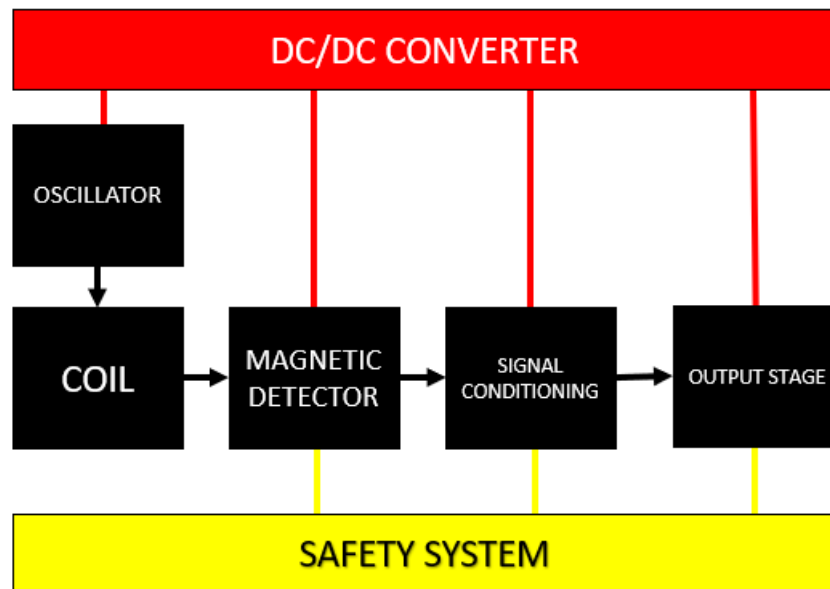


Figura 70 Arquitectura detector inductivo

4.13.3. Comunicaciones

Los detectores inductivos de seguridad son de canal doble, se conectan directamente en las entradas de los módulos de seguridad y serán procesados por el PLC de seguridad.

4.13.4. Integración en arquitectura SW del sistema

El tratamiento de los datos provenientes del detector inductivo se realiza en el PLC de seguridad. Existe una función que trata la señal proveniente de los sensores y establece la lógica para el funcionamiento de los actuadores.

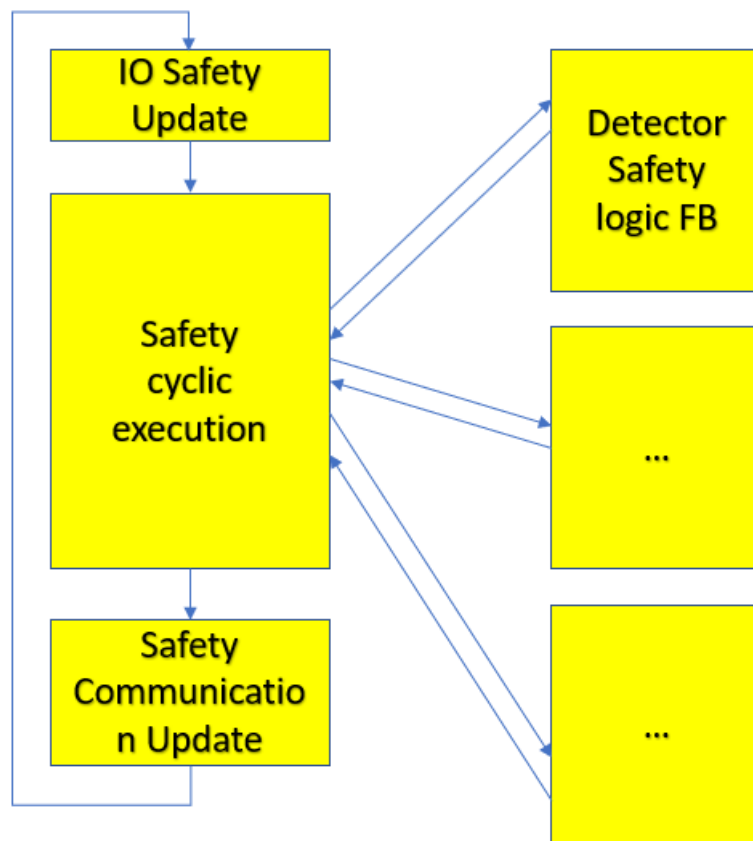


Figura 71 Estructura de llamadas PLC seguridad

4.14. Sensor temperatura IO Link

4.14.1. Descripción

El sensor de temperatura de la marca STEGO es el empleado en el proyecto. Este sensor se emplea para el sensado de la temperatura de la sala y aplicar una corrección en el posicionamiento de la estación con el fin de mantener la tolerancia de posicionamiento definida. (Stego)



Figura 72 Sensor de temperatura

A continuación, se enumeran las características más destacadas del sensor:

- Tensión de funcionamiento: 24V
- Potencia: 2W
- Rango de medición de temperatura: -40 a 80°C
- Precisión de la medida: 0.5°C
- Protocolo de salida de datos: IO Link 1.1
- Grado de protección: IP20

Este sensor de temperatura está basado en una PT100. Estas termo-resistencias de platino tienen la siguiente ecuación característica:

$$R = R_0 + (1 + \alpha * \Delta T)$$

Donde R_0 es la resistencia característica temperatura de referencia, α es el coeficiente de temperatura y ΔT la diferencia de temperaturas.

Las termo-resistencias de platino presentan muy buenas características para ser empleadas como sensores de temperatura, entre ellas:

- Alta resistividad
- Alto margen de temperatura
- Alta linealidad

(Creus, 2011) (Areny, 2003) (Antonio Serna Ruiz, 2010)

4.14.2. Arquitectura

A continuación, se muestra la Figura 73 Arquitectura sensor temperatura.

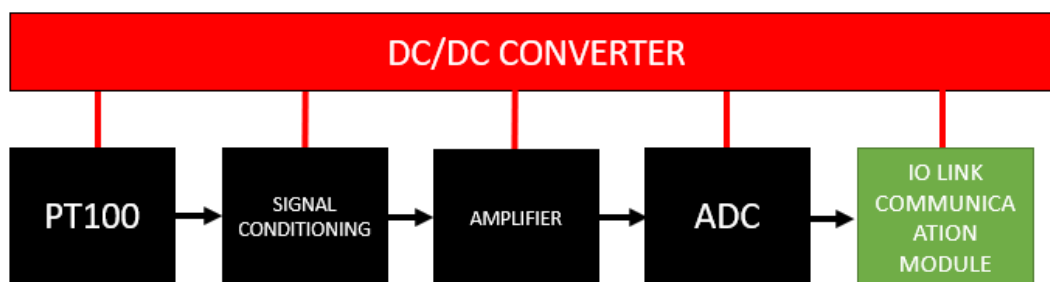


Figura 73 Arquitectura sensor temperatura

Como se muestra en la Figura 73 Arquitectura sensor temperatura anterior, el módulo sensor de temperatura está formado por el elemento sensor, una PT100, módulos de acondicionamiento de señal y amplificación, convertidor analógico/digital y módulo de comunicación IO Link. (Adel S. Sedra, 2006)

4.14.3. Comunicaciones

El módulo sensor de temperatura dispone de un módulo de comunicaciones IO Link, trabaja como equipo esclavo del maestro del bus del PLC. Se conecta mediante 3 hilos, alimentación, masa y datos.

El valor de temperatura se envía en formato entero con signo (16 bits), los decimales van implícitos en el valor por lo que hay que transformarlo en el PLC, transformándolo en real y dividiéndolo por 100.

4.14.4. Integración en arquitectura SW del sistema

El valor de temperatura leído por la sonda se integra en el lazo de posicionamiento para realizar una compensación de las carreras en el eje X y en el eje Z. Conviene mencionar que las carreras en el eje X, por ejemplo, de extremo a extremo son de más de 40m, con lo que no compensarlas supondría cambios de hasta 6-7mm en el posicionamiento final de la estación. Esto implica que la comprobación con el láser tracker sería errónea generando una alarma, cuando el único problema son las dilataciones/contracciones del metal por efecto de la temperatura.

La función de compensación de temperatura es llamada por el OB1 en cada ciclo de scan. Esta función recibe como argumentos de entrada las cotas de destino de los ejes X y Z, devolviendo el valor actualizado según la temperatura. Estas salidas son las que atacan a las funciones de motion control

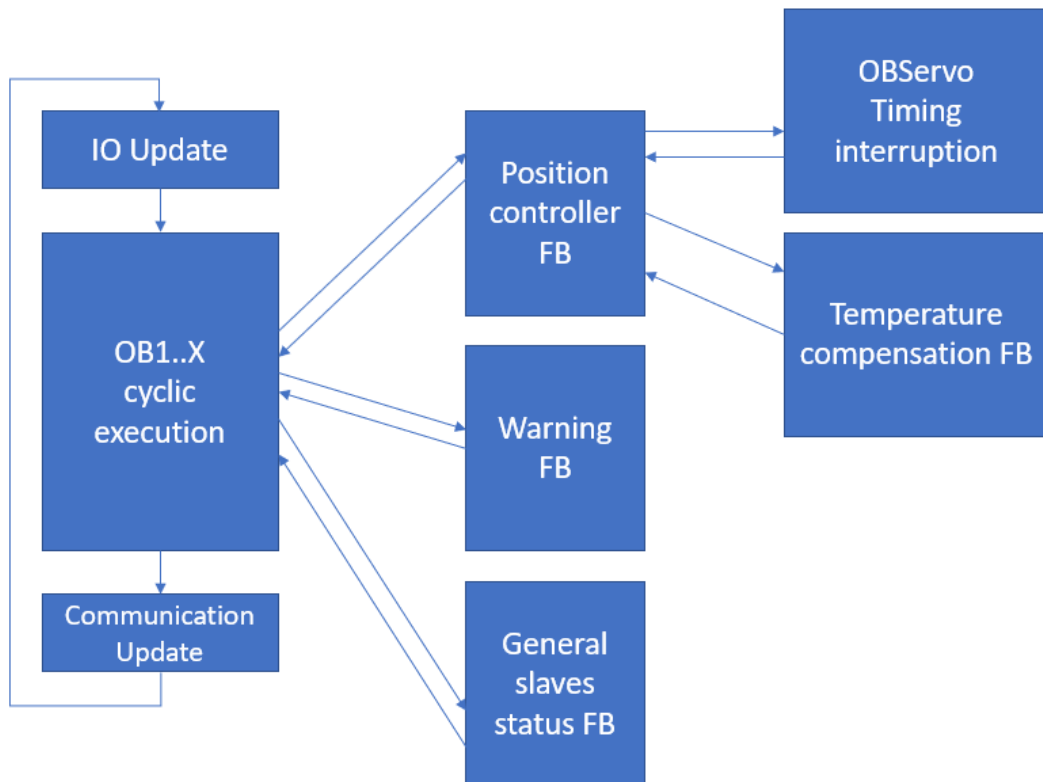


Figura 74 Estructura de llamadas PLC

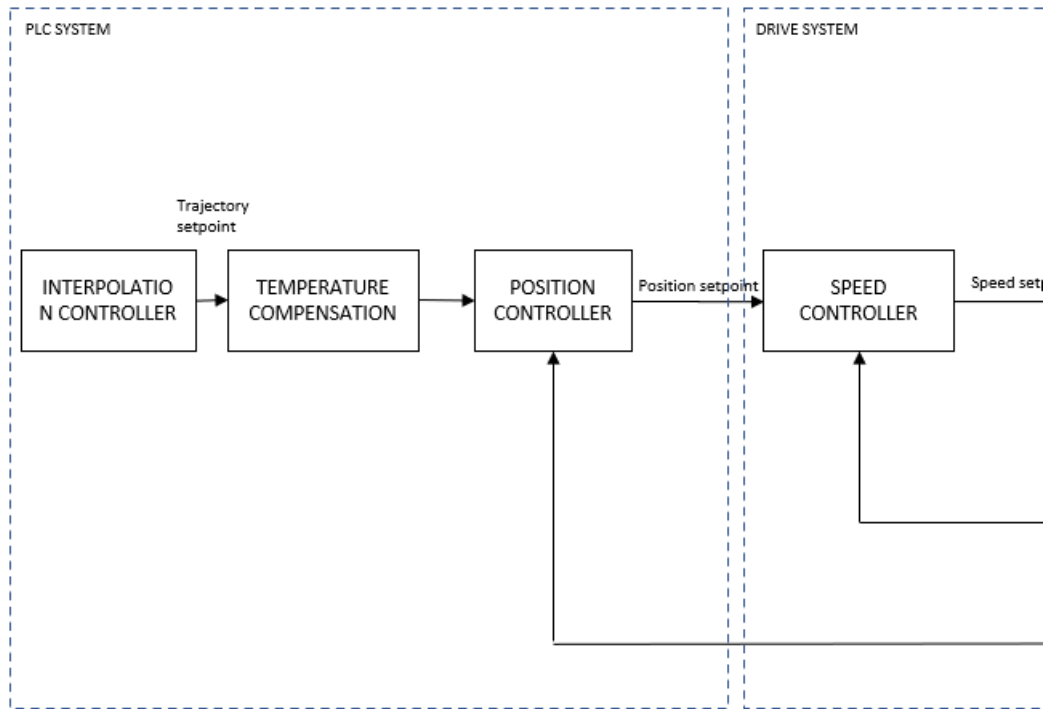


Figura 75 Posición compensación temperatura

4.15. Regla de posicionamiento eje Z

4.15.1. Descripción

Un encoder lineal o regla de posicionamiento es un sistema de medida que acoplado a un sistema mecánico móvil devuelve una señal de posición al controlador.

Este tipo de sistemas se emplean como elementos de posicionamiento secundario, ya que suelen encontrarse en el extremo de la cadena cinemática, absorbiendo así cualquier error mecánico debido a deformaciones de los eslabones, backlash entre piñones y demás.

Se muestra en la Figura 76 Cadena mecánica un diagrama para ilustrar lo comentado en el párrafo anterior.

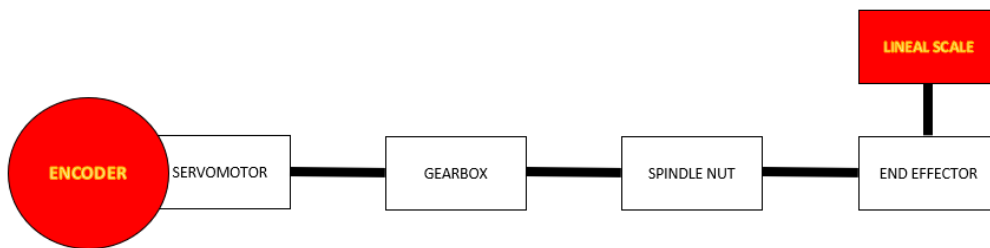


Figura 76 Cadena mecánica

En la Figura 76 Cadena mecánica se muestra cadena cinemática de un accionamiento. Se aprecia como mientras que el encoder del servo, no tiene en cuenta ninguno de los errores mecánicos existentes por encontrarse al principio de la cadena, el encoder lineal, al encontrarse al final de la misma, es capaz de posicionar el end effector en su posición de destino adecuadamente absorbiendo estos errores. El principal error que compensa es el backlash (también se puede compensar por SW si de antemano se conoce o se calcula, aunque este método es menos preciso y muy costoso en horas), que se muestra en la Figura 77 Concepto Backlash. (notes)

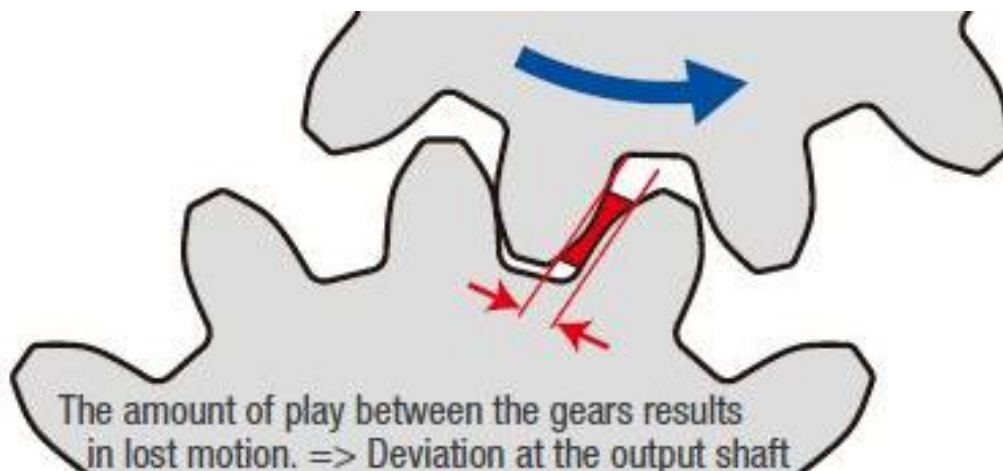


Figura 77 Concepto Backlash

El encoder lineal empleado es del tipo incremental con marcas absolutas, lo que quiere decir que básicamente es una escala ranurada con marcas absolutas cada 10mm.

4.15.2. Arquitectura

La arquitectura de un encoder lineal es similar al de un encoder ordinario, el sistema básicamente está formado por una guía perforada y el cabezal dispone de elementos led y fotodetectores.

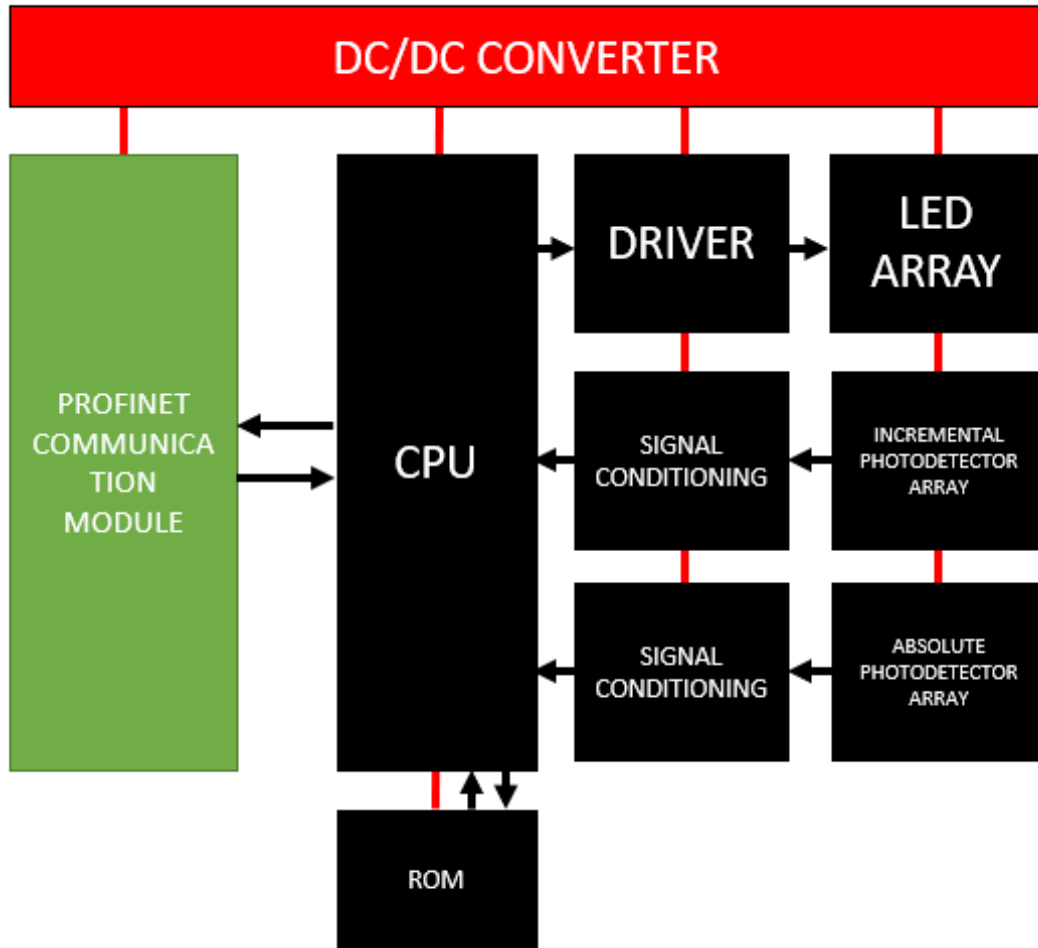


Figura 78 Arquitectura Encoder lineal

La principal diferencia con los encoders asociados a los servomotores es que este dispone de un módulo de comunicaciones Profinet, ya que no forma parte de los sistemas de motion de Siemens, que como se ha visto anteriormente disponen de un bus de comunicaciones propio, Drive cliq.

4.15.3. Comunicaciones

El módulo encoder lineal dispone de conectividad Profinet. El PLC hace uso de el a través de la red de comunicaciones Profinet interna de máquina. Los datos son enviados como un entero largo con signo, 32 bits.

Por otro lado, el módulo encoder lineal es un periférico, por lo que además del propio valor de la posición del cabezal dispone de 4 bytes de estado y 1 byte de control. Con estas áreas de transferencia el PLC el capaz de referenciar el encoder y leer su estado y alarmas en tiempo real.

4.15.4. Integración en arquitectura SW del sistema

El módulo encoder lineal se encarga de cerrar el lazo de posición del eje Z, de este modo se produce una compensación en tiempo real de la posición del eje sin necesidad de utilizar algoritmos post posicionamiento, que son los que corrigen la posición una vez el servomotor ha alcanzado su destino. En este caso, la posición del servomotor se calcula en base a la posición del encoder lineal y no de su encoder propio.

En la siguiente Figura 79 Lazo posición eje Z se explican estos conceptos.

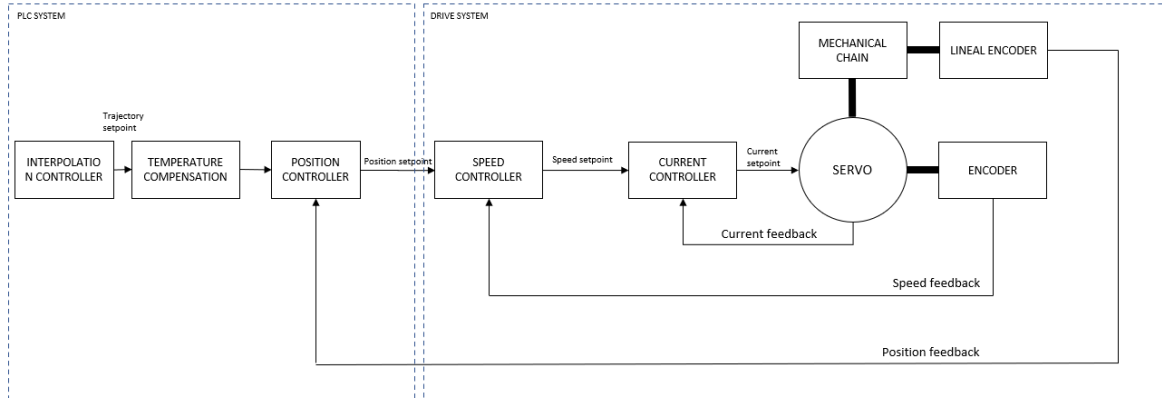


Figura 79 Lazo posición eje Z

Como se muestra en la Figura 79 Lazo posición eje Z, el encoder del servo cierra el lazo de velocidad, este lazo es muy rápido (alta dinámica) y requiere que las componentes de alta frecuencia de la respuesta mecánica lleguen lo antes posible y con la mayor rigidez al controlador de velocidad. Si se emplease el encoder lineal para cerrar el lazo de velocidad, la dinámica del sistema mecánico desestabilizaría el sistema debido a las holguras y no linealidades sin modelar y para hacer estable el lazo habría que reducir mucho el ancho de banda de la respuesta, haciendo que el regulador de velocidad no actúe correctamente. Con la estrategia de la imagen, se mantiene la dinámica del eje y además se compensan las no linealidades del sistema mecánico sensando la posición sobre el end effector directamente.

A continuación, se explicará de forma general como modelar un sistema mecánico y representarlo en un diagrama de bode, en primera instancia se muestra la respuesta en frecuencia de un sistema rígido, sin acoplamientos elásticos. (review)

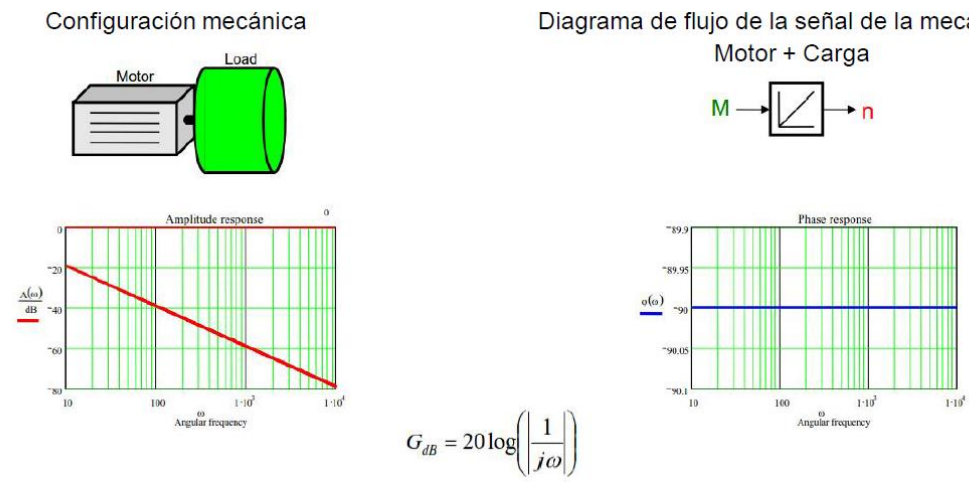


Figura 80 Motor con acoplamiento rígido

Se muestra en la figura anterior como la respuesta es paso bajo, con un polo en el origen.

En la siguiente imagen se muestra la contribución de un acoplamiento con cierto grado de flexibilidad.

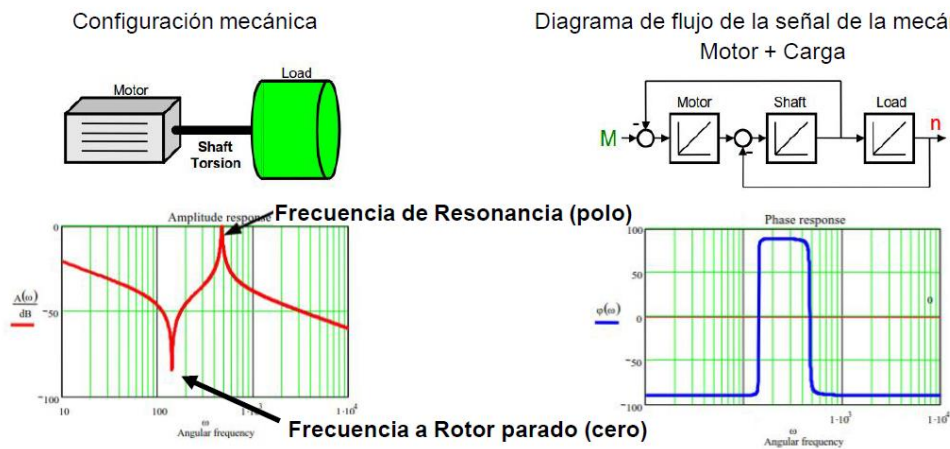


Figura 81 Respuesta en frecuencia con acoplamiento flexible

Se muestra en Figura 82 Respuesta en frecuencia de sistema con múltiples acoplamientos, como este acoplamiento añade un polo y un cero a la respuesta en frecuencia, haciendo necesario compensar el sistema para aplanar esta respuesta, disminuyendo ganancia para evitar que el sistema sea inestable.

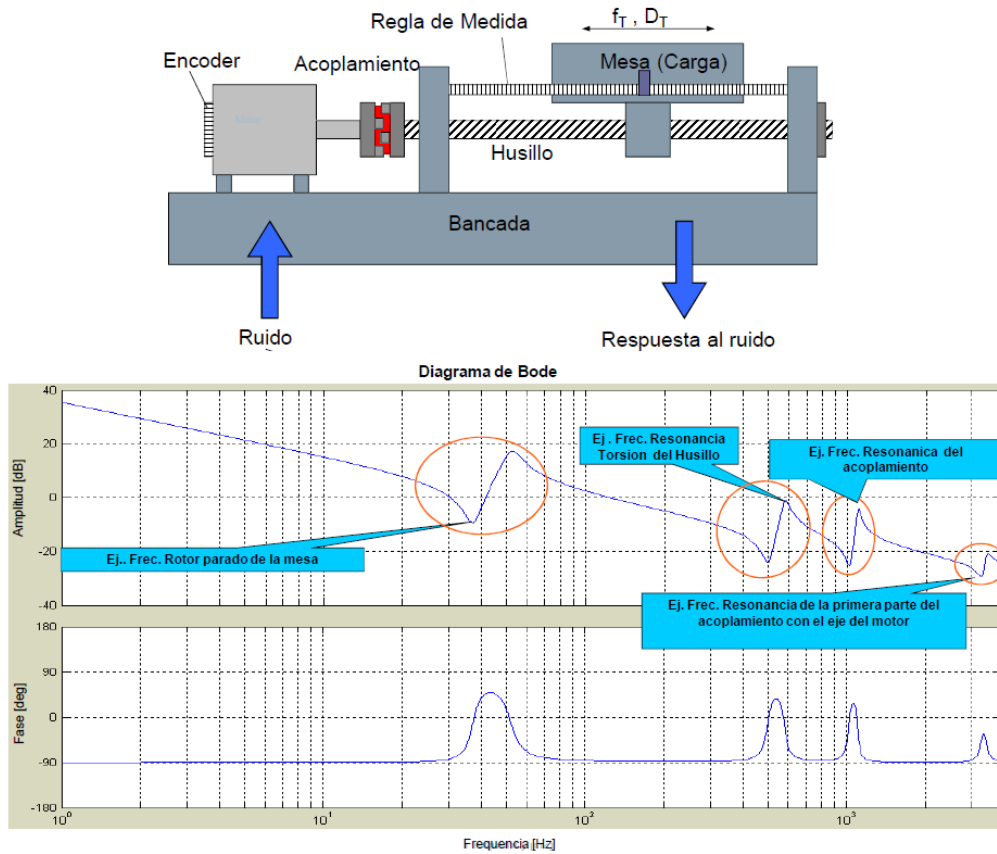


Figura 82 Respuesta en frecuencia de sistema con múltiples acoplamientos

Se observa en la Figura 83, como la contribución de cada acoplamiento es un polo + cero a una determinada frecuencia. En lazo cerrado y con un controlador PID esto se atenúa mucho dando lugar a sistemas estables, aunque cada acoplamiento limita un cierto margen de frecuencias haciendo que la ganancia disminuya.

(W.Bolton, 2001)

5. Arquitectura software

En este apartado se revisará la arquitectura software del sistema pick and place, se describirá el IDE, la estructura de código, principales algoritmos...

5.1. Entorno de programación, IDE

El entorno de desarrollo integrado usado para la programación y desarrollo de proyectos para autómatas Siemens es el TIA (*totally integrated automation*) PORTAL. Bajo TIA PORTAL se define la arquitectura hardware del proyecto, entorno de comunicaciones, arquitectura software, programación de los bloques funcionales y además dispone de herramientas para la realización de la puesta en marcha de los distintos elementos hardware. (Siemens, Programming guideline for S7 1500)

A continuación, se muestra la del aspecto general.

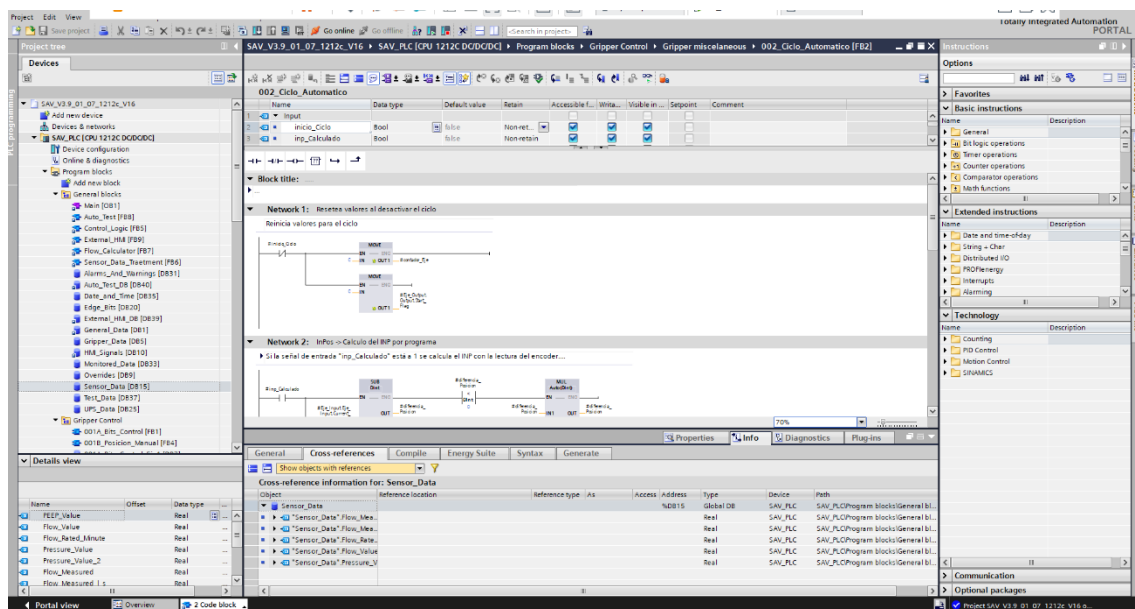


Figura 83 TIA Portal

A la izquierda vemos el árbol de proyecto, este contiene tanto los recursos HW como SW del proyecto. La parte SW puede organizarse en carpetas para un mejor control en proyectos grandes. En el centro de la imagen se muestra el editor de código, a la derecha los recursos del programador y en la parte baja la información general, compilador, referencias cruzadas...

La cinta de opciones de la parte superior tiene accesos directos para la conexión online con el PLC, botones de descarga y subida del proyecto, etc...

TIA PORTAL dispone de cientos de opciones de configuración de HW, comunicaciones y recursos SW, muchos de ellos se irán viendo de forma implícita en los siguientes apartados.

5.2. Estructura del código

En este apartado se expondrá la estructura del código en bloques funcionales y se realizará una descripción de funcionamiento de cada uno de ellos. A continuación, se muestra la de la arquitectura SW.

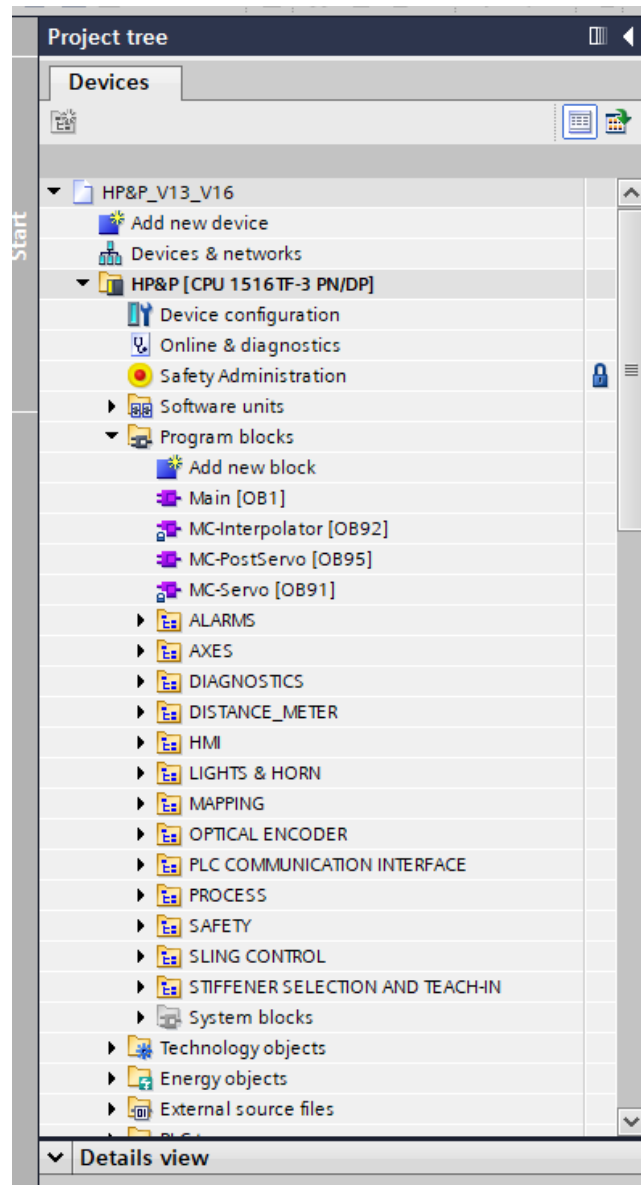


Figura 84 Árbol de funciones

El código se ha estructurado en las siguientes carpetas

- Alarmas, contiene los bloques funcionales y bases de datos para el funcionamiento del sistema de alarmas y warnings. Estas se generan ante determinados eventos internos del código o simplemente ante la activación de sensores o entradas por comunicaciones.
- Axes, contiene los bloques funcionales y bases de datos para la gestión y control de los distintos ejes de que se compone el sistema así como los ejes virtuales para el movimiento sincronizado de los ejes reales.

- *Diagnostics*, contiene las funciones para la llamada a los recursos HW de diagnóstico built in de que dispone el PLC.
- *Distance Meter*, contiene los bloques funcionales y bases de datos para la gestión y control del distanciómetro laser.
- *HMI*, contiene los bloques funcionales y bases de datos para la visualización de variables y control de las funciones del equipo a través del HMI táctil de que dispone el sistema.
- *Lights&Horn*, contiene los bloques funcionales y bases de datos para el funcionamiento de las balizas acústica y lumínica. Estas se usan para alertar al operador acerca del estado de la estación.
- *Mapping*, contiene los bloques funcionales y bases de datos para el intercambio de información entre la estación y el sistema de control de la línea en la que está integrada.
- *Optical encoder*, contiene los bloques funcionales y bases de datos para recibir y procesar los datos provenientes de los encoders ópticos que cierran el lazo de posicionamiento del *grantry*.
- *Process*, contiene los bloques funcionales y bases de datos para el funcionamiento del proceso principal del sistema pick and place, que consiste en coger y dejar elementos del fuselaje en las distintas estaciones dentro del alcance.
- *Safety*, contiene los bloques funcionales y bases de datos de seguridad para un funcionamiento en modo seguro de personas y entre maquinas.
- *Sling control*, contiene los bloques funcionales y bases de datos para el control de la eslinga de agarre y sus sensores y actuadores.

El código está organizado alrededor la función *main*, OB1, el cual realiza las llamadas de forma secuencial a los distintos bloques de código excepto a los que son de naturaleza interrupción cíclica, los cuales se llaman según la base de tiempos, estos son principalmente el bloque de seguridad y los bloques para el control de los servomotores, *interpolator*, post servo y servo.

A continuación, se muestra la Figura 85 Contenido Main

y los principales segmentos de que consta (segmento es agrupación virtual de líneas de código).

▼	Block title: **** MAIN PROGRAM ****
	Comment
▶	Network 1: OPERATION MODE CONTROL
▶	Network 2: I/O MAPPING
▶	Network 3: SAFETY MAPPING
▶	Network 4: PLC ALARMS & WARNINGS
▶	Network 5: MAINTENANCE DOOR
▶	Network 6: "Y" AXIS OPTICAL ENCODER
▶	Network 7: POWER CONTROL
▶	Network 8: AXES CONTROL
▶	Network 9: AXES BLOCKS
▶	Network 10: LIGHTS & HORN
▶	Network 11: DISTANCE METER - (ANGLE ERROR)
▶	Network 12: SLING CONTROL (Pneumatic & Safety sensors)
▶	Network 13: CRANE LOAD CELLS
▶	Network 14: CLAMPS TEST (Quality Control)
▶	Network 15: PROCESS CONTROL
▶	Network 16: POSITIONS LABELS (in order to monitoring where is the axis)
▶	Network 17: STIFFENER SELECTION & TEACHING
▶	Network 18: PLC COMMUNICATION INTERFACE
▶	Network 19: DIAGNOSTICS (IO devices slaves for which a problem has occurred)
▶	Network 20: ACK all alarms
▶	Network 21: HEARTBEAT (HMI KTP Communication check)

Figura 85 Contenido Main

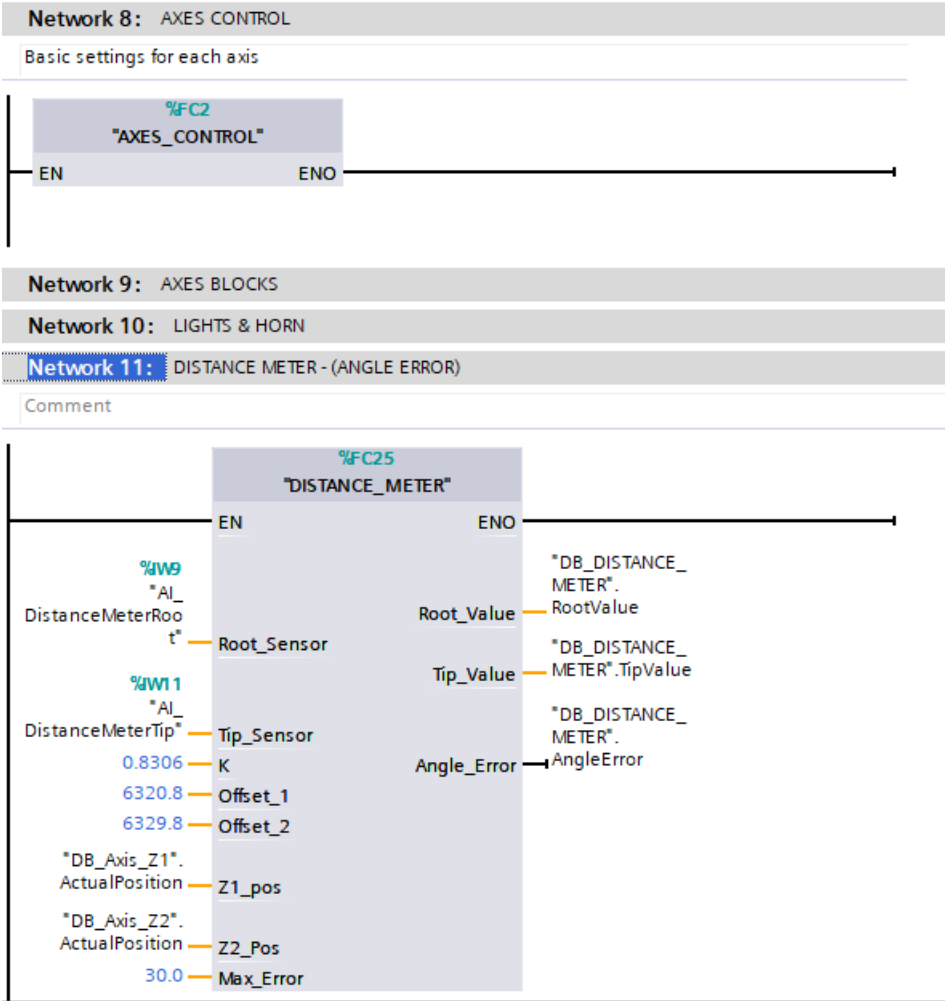


Figura 86 Segmentos expandidos

En esta última imagen se aprecian las funciones que se llaman en cada uno de ellos.

5.3. Código de seguridad

En este subapartado se explicará el código de seguridad para el funcionamiento de la estación.

El código de seguridad es llamado por una interrupción cíclica con alta prioridad, esta lanza el Main de seguridad que es el que va llamando a las diferentes funciones de seguridad, incluidas las que gestionan las comunicaciones de seguridad.

A continuación, se muestra la .

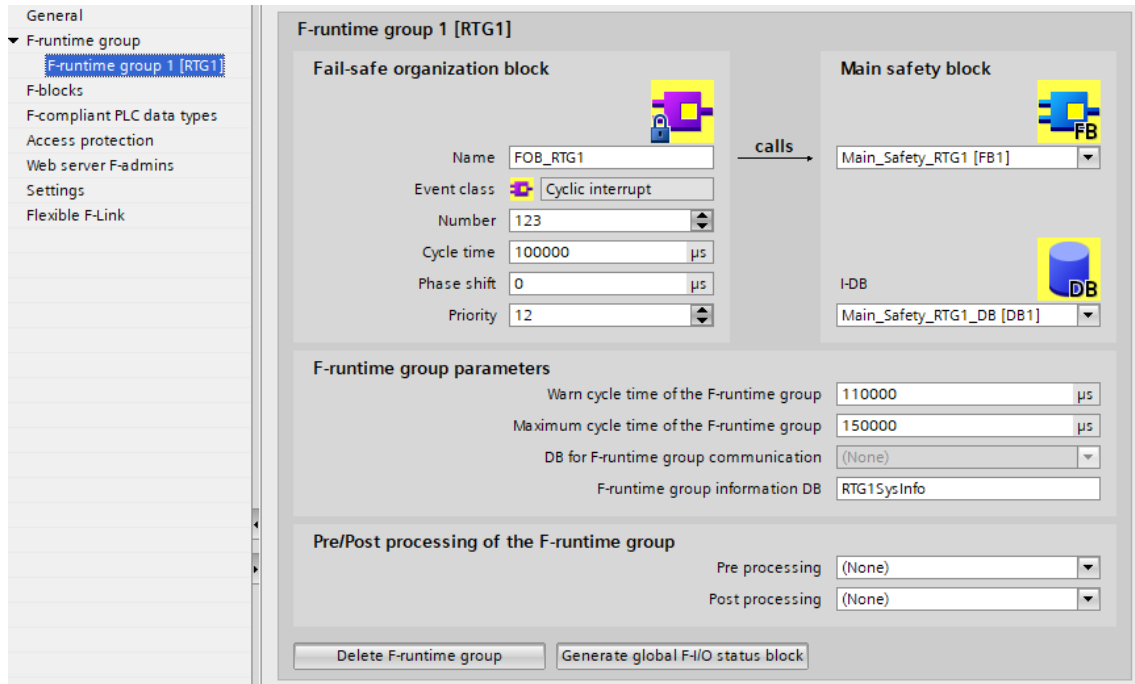


Figura 87 Configuración PLC Safety

Vemos como la interrupción cíclica se llama RTG1 y se activa cada 100ms, la cual lanza el *main* de seguridad, que tiene asociada la base de datos I-DB. El tiempo de activación de la interrupción cíclica puede ser disminuido hasta el doble del ciclo de scan, típicamente 20ms. El valor actual es más que suficiente para garantizar la respuesta del sistema de seguridad para personas.

A continuación, se muestra la .

Block title: MAIN SAFETY PROGRAM	
Comment	
Network 1:	RECEIVE DATA FROM PLC LINE
Network 2:	ACK RCVDP
Network 3:	Signal ACK
Network 4:	CLAMPS OF SLING (0 deg & 90 deg safety signals)
Network 5:	OUT OF LIMITS Y
Network 6:	SLING PRESENCE (Safety parking of sling) - Mandatory to move "Y" axis
Network 7:	CLEAN STOP REQUEST
Network 8:	AA00 EMERGENCY STOP BUTTON
Network 9:	EMERGENCY STOP - CHAIN OF SIGNALS
Network 10:	EMERGENCY STOP - SIGNAL PROCESSED
Network 11:	E_STOP_INV (Fast Stop)
Network 12:	MAINTENANCE DOOR CONTROL
Network 13:	QR Encoder Root - 1=Acknowledgment for reintegration
Network 14:	QR Encoder Tip - 1=Acknowledgment for reintegration
Network 15:	Data safe encoder QR Y-Root
Network 16:	Data safe encoder QR Y-Tip
Network 17:	KTP_MOBILE - Box1
Network 18:	KTP_MOBILE - Box2
Network 19:	KTP_MOBILE - Box3
Network 20:	KTP_MOBILE - Box4
Network 21:	KTP_MOBILE - Box5
Network 22:	KTP_RNG - Box1
Network 23:	KTP_RNG - Box2
Network 24:	KTP_RNG - Box3
Network 25:	KTP_RNG - Box4
Network 26:	KTP_RNG - Box5
Network 27:	HMI EMERGENCY STOP SIGNAL

Figura 88 Contenido PLC Safety

Cada segmento realiza una tarea de seguridad necesaria para el funcionamiento de la estación. Se mostrará la cadena de seguridades clásica, formada por las setas de emergencia, así como las señales de seguridad enviadas y recibidas con los servomotores.

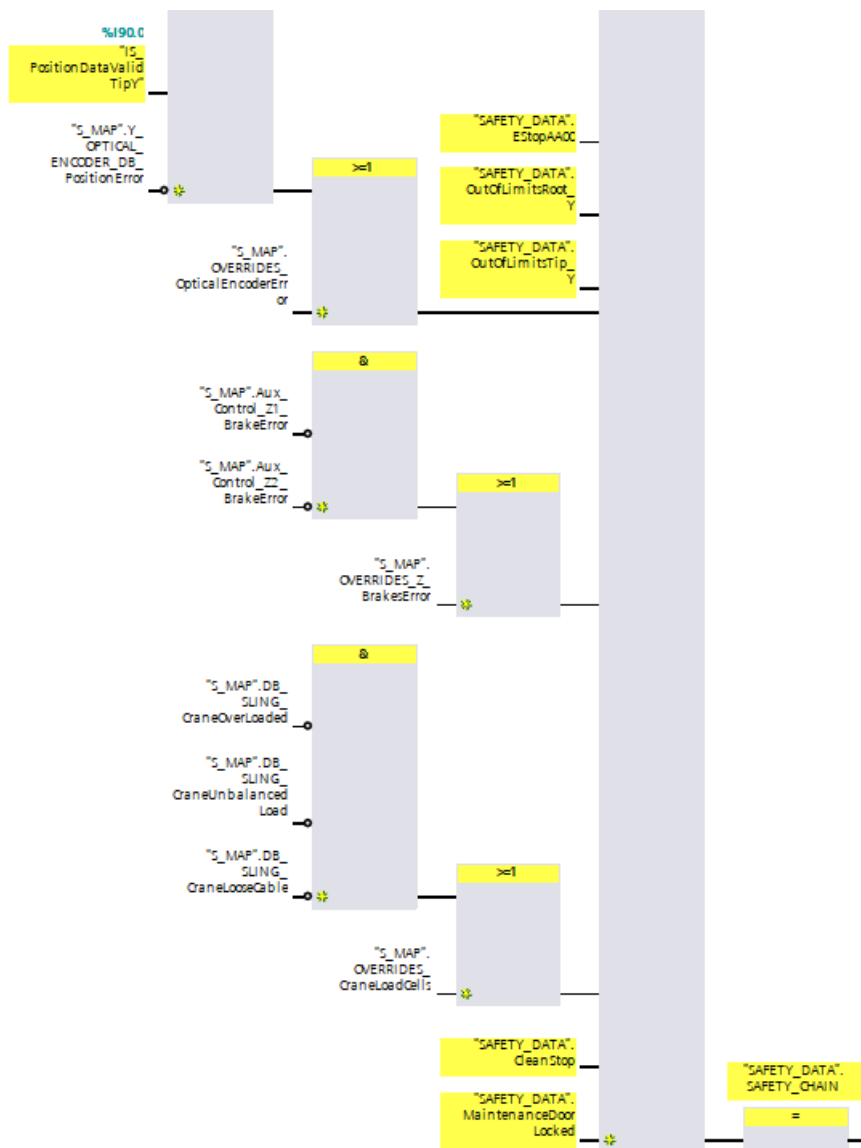


Figura 89 Cadena de seguridad

La cadena de seguridad mostrada en la está programada en FBD (diagrama de bloque de funciones). Básicamente se muestran bloques lógicos “and”, representados por un & y bloques lógicos “or” representados por un >=1. Las señales sombreadas en amarillo son de seguridad, las cuales son procesadas por el PLC de seguridad, mientras que las señales sin sombreado son señales no seguras, aunque pueden usarse en el PLC de seguridad mediante un link en el código. El resultado de la cadena de seguridad se almacena sobre el bloque “=”.

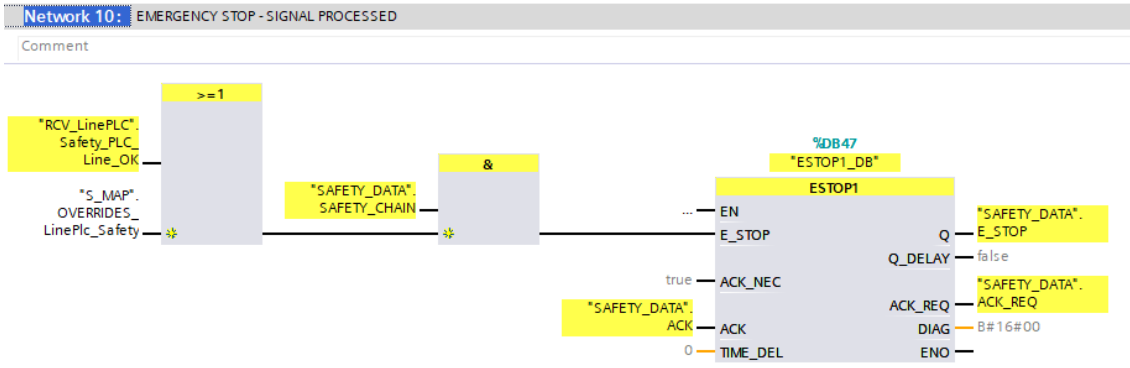


Figura 90 Enclavamiento de seguridad

Esta señal es usada en el network anterior como entrada al bloque de seguridad ESTOP1, el cual es un enclavamiento de seguridad, siempre que su entrada E_STOP sea 1 ante flanco positivo en ACK se enclava a 1 la salida Q, quedando en este estado siempre y cuando no se produzcan flancos negativos en E_STOP. Quedando de este modo la máquina rearmada.

5.4. Algoritmo de posicionamiento secundario eje X

El lazo de posicionamiento secundario del eje X es de vital importancia para el correcto posicionamiento del gantry sobre las estaciones de trabajo.

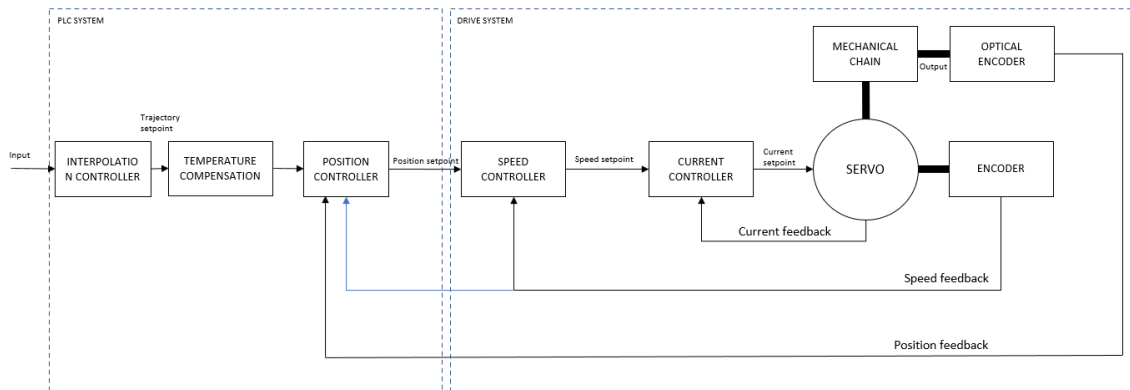


Figura 91 Lazo posicionamiento eje x

El sistema dispone de varios recursos aparte del algoritmo para controlar el correcto funcionamiento de todo el conjunto. En primera instancia, cuando se lanza un movimiento, el algoritmo no controla la relación de posición en cada uno de los servomotores del gantry, simplemente monitoriza que el error entre los lados del gantry no supera los 10 mm, independientemente del desfase entre la posición leída por los encoders primarios y los ópticos. En cada ciclo de scan el sistema actualiza la posición del encoder primario en función del encoder secundario de su lado del gantry.

Una vez el gantry ha llegado a la posición destino, el algoritmo inicia una serie de iteraciones sucesivas hasta que la distancia entre ambos lados del gantry está por debajo de 1mm, esto es transparente para el operador que solo ve que el movimiento aún no ha terminado sin tener noción de estos ajustes.

En caso de que tras 10 iteraciones el error no baje de 1mm, el sistema para con su mejor aproximación y una alarma aparece indicando el error de posicionamiento.

5.5. Algoritmo de reparto de par

El reparto de par en los servomotores que mueven el gantry es de vital importancia para que las funciones de posicionamiento de alto nivel funcionen correctamente. El reparto de par ocurre por separado en cada lado del gantry sin que haya acoplamiento entre ambos lados.

Básicamente el algoritmo de reparto de par funciona de la siguiente manera: Uno de los servomotores, el maestro, trabaja en modo posición, y el esclavo en modo velocidad. Cuando se inicia un movimiento, se manda al maestro a una posición determinada, este comienza a rotar para seguir la consigna de posición. En ese momento, se arranca el esclavo con una velocidad un 0.01% mayor que el maestro, con lo que tratará de “adelantarlo”, en ese momento comienza, sin controlar posición, a aportar par al movimiento.

Es necesario limitar el Par del esclavo como mucho al del maestro, ya que puede tratar de aportar más par del necesario y que entonces el maestro trate de frenar el movimiento, con lo que no sería útil este algoritmo.

Las mediciones de velocidad en tiempo real y par en tiempo real están disponibles en el PLC en cada ciclo de scan actualizados como parte del paquete de datos que el sistema de comunicaciones con los servomotores actualiza.

5.6. Sistema de sensado de carga

El sistema de sensado de carga hace uso de las células de carga instaladas en los interfaces mecánicos entre la eslinga y el eje Z.

El Algoritmo principal se encarga de comprobar que el centro de masas de la sección del avión se encuentra equilibrado en todo momento, con el fin de restringir los esfuerzos transmitidos por un desequilibrio del mismo sobre los interfaces mecánicos de cogida. Para ello, durante las fases de aceleración, velocidad nominal y deceleración del eje Z, comprueba que los valores leídos por las células de carga, taradas previamente a la masa de la eslinga en vacío, son como mucho la mitad de la masa de la sección multiplicado por la aceleración más menos el 15%. En caso contrario se produce una parada controlada, y se genera una alarma para que un experto inspeccione el sistema de cogida y amarre.

6. Conclusiones

En esta memoria se han explicado, haciendo hincapié en la arquitectura hardware y arquitectura software, los detalles tanto constructivos como de funcionamiento de una estación pick and place para el movimiento y posicionamiento de precisión de elementos aeronáuticos.

El sistema pick and place presenta una serie de características, recursos y algoritmos muy comunes en sistemas de posicionamiento de alta precisión como pueden ser brazos robóticos o máquinas cartesianas. En esta estación se aplican sobre un gantry de decenas de metros de carrera y para el posicionamiento de elementos de cientos de kilogramos de masa. El hecho de no existir un producto en el mercado de similares características ni para el mismo propósito, hacen de esta estación un buen sujeto de estudio para realizar un análisis del proceso y la sensorica necesaria para poder llevar a cabo la tarea para la que ha sido concebido.

Se ha tratado de dar un enfoque HW y SW a la memoria con el fin de amoldar la descripción al ámbito en el que está enmarcado el máster. Por ello se han centrado los esfuerzos en mostrar la arquitectura y principio físico de funcionamiento del sensor. También se ha realizado un apartado específico del PLC y como gestiona el resto de elementos HW de la línea y gestiona internamente la arquitectura SW del sistema.

El talón de Aquiles de esta estación son los sistemas de posicionamiento, si bien son bastante precisos, limitan el posicionamiento del sistema. Es necesario incluir hasta tres sistemas diferentes de realimentación para poder posicionar de forma eficiente la estación, encoder primario, reglas lineales o encoders ópticos, y por último laser tracker. Los tres últimos son relativamente novedosos en cuanto a su uso para estos cometidos. La cámara es muy sensible a un mal posicionamiento de su código QR, la regla es muy delicada de manejo y el láser tracker es muy lento de respuesta como para poder ser empleado para cerrar el lazo secundario. En este campo de medida de posición se buscan sensores que sean robustos, de respuesta rápida, del orden de los us, y muy precisos y repetitivos (lo ideal y estándar de la industria aeronáutica, 1 décima de milímetro). Cualquier mejora o evolución en este campo aporta a este tipo de productos mejoras en el posicionamiento y ahorro de costes en tanto en cuanto se pueda ahorrar en la cantidad de elementos de sensado de posición que se deban instalar, programar y ajustar.

Por otro lado, los sistemas de cómputo, procesadores del PLC y de los sistemas motion, son cada vez más potentes en la actualidad se sitúan en la vanguardia en cuanto a tecnología se refiere, de hecho, emplean tecnologías hardware propias de computadores tales como múltiples núcleos y recursos hardware dedicados para la aceleración de tareas. En un origen, los CNC, estaban basados en PCs, copando todo el mercado de control de ejes, en la actualidad, los PLC de familias tecnológicas presentan velocidades de reloj y capacidades de procesado similares a los mejores PC del mercado. Es por ello que los sistemas de interpolación de ejes están empezando a estar basados en PLC. Por lo tanto, cualquier mejora en los chips que conforman los sistemas de cómputo al poco tiempo es integrada en los PLC mejorando sus prestaciones, por lo que este ámbito de la microelectrónica está estrechamente ligado a los sistemas de control de posicionamiento más punteros del mercado.

En resumen, la estación pick and place es un sistema muy complejo en el que por medio de una cuidadosa selección de sensores y actuadores y empleando un PLC de última generación como elemento de cómputo e hilo conductor del resto de elementos se da solución al problema de posicionamiento de grandes estructuras de cientos de kilogramos con precisiones de décimas de milímetro en intervalos de tiempo de ciclo del orden de los minutos.

7. Listado de figuras

Figura 1 Alzado de la estación.....	7
Figura 2 Detalle de guiado y rueda	8
Figura 3 Planta de la estación	8
Figura 4 Layout.....	9
Figura 5 Flujograma de proceso.....	10
Figura 6 Diagrama de red	19
Figura 7 s7 1500	20
Figura 8 Arquitectura interna PLC (elaboración propia)	24
Figura 9 Periferia en rack	26
Figura 10 Periferia descentralizada.....	27
Figura 11 Sistema de control de posición	28
Figura 12 Estructura SW para motion control	29
Figura 13 Tipos de objeto tecnológico	30
Figura 14 Recursos motion necesarios, fuente: Siemens s7-1500 datasheet.....	31
Figura 15 Arquitectura Drive system.....	32
Figura 17 Generación de portadora de control	33
Figura 18 Drive system	34
Figura 19 Esquema de motion system	35
Figura 20 Servomotor.....	36
Figura 21 Curva Speed-torque (Siemens, S120 drive datasheet).....	37
Figura 22 Logo Profinet	38
Figura 23 Pila de protocolos Profinet.....	39
Figura 24 Ciclo Profinet	39
Figura 25 Inicio Proneta	40
Figura 26 Vista Proneta	40
Figura 27 Vista diagrama de red	40
Figura 28 Esclava Profinet	41
Figura 29 Arquitectura de red con PN coupler	41
Figura 30 Arquitectura Profisafe	42
Figura 31 Función rcv de seguridad	43
Figura 32 Función Send de seguridad	44
Figura 33 Logo IO LINK	45
Figura 34 Arquitectura red IO link.....	45
Figura 35 Logo OPC UA.....	46
Figura 36 Calculo de Performance level.....	47
Figura 37 PLC S7 1500 Safety	48
Figura 38 Tarjeta de seguridad.....	49
Figura 39 Arquitectura de seguridad.....	49
Figura 40 Seta de seguridad	50
Figura 41 Conexionado seta 2 canales	51
Figura 42 Barrera Laser	52
Figura 43 Escáner de seguridad	53
Figura 44 Áreas de seguridad	53
Figura 45 Sensor inductivo de seguridad	54
Figura 46 Cerradura de seguridad.....	55

Figura 47 HMI KPT	57
Figura 48 HMI + Connection Box.....	58
Figura 49 Entorno WinCC	59
Figura 50 Propiedades objeto WinCC	59
Figura 51 Laser en trípode.....	63
Figura 52 Cabezal laser tracker	64
Figura 53 Reflectores Laser tracker.....	64
Figura 54 Posición reflectores Laser.....	65
Figura 55 Características encoder óptico.....	67
Figura 56 Código encoder	68
Figura 57 Arquitectura HW encoder	68
Figura 58 Ángulos de lectura.....	71
Figura 59 Ángulos de lectura 2.....	71
Figura 60 Mapa de datos Encoder óptico	72
Figura 61 Arquitectura de red	73
Figura 62 Estructura de llamadas PLC.....	74
Figura 63 Algoritmo lazo secundario.....	75
Figura 64 Encoder rotativo.....	76
Figura 65 Muestras Encoder	76
Figura 66 Arquitectura HW encoder	77
Figura 67 Célula de carga	79
Figura 68 Arquitectura célula de carga	80
Figura 69 Funcionamiento detector inductivo.....	81
Figura 70 Detector inductivo.....	82
Figura 71 Arquitectura detector inductivo.....	82
Figura 72 Estructura de llamadas PLC seguridad	83
Figura 73 Sensor de temperatura	84
Figura 74 Arquitectura sensor temperatura	85
Figura 75 Estructura de llamadas PLC.....	86
Figura 76 Posición compensación temperatura.....	87
Figura 77 Cadena mecánica	88
Figura 78 Concepto Backlash	88
Figura 79 Arquitectura Encoder lineal	90
Figura 80 Lazo posición eje Z.....	91
Figura 81 Motor con acoplamiento rígido	92
Figura 82 Respuesta en frecuencia con acoplamiento flexible.....	92
Figura 83 Respuesta en frecuencia de sistema con múltiples acoplamientos.....	93
Figura 84 TIA Portal.....	95
Figura 85 Árbol de funciones	96
Figura 86 Contenido Main.....	98
Figura 87 Segmentos expandidos	99
Figura 88 Configuración PLC Safety.....	100
Figura 89 Contenido PLC Safety	101
Figura 90 Cadena de seguridad	102
Figura 91 Enclavamiento de seguridad	103
Figura 92 Lazo posicionamiento eje x	104

8. Bibliografía

- Adel S. Sedra, K. C. (2006). *Circuitos microelectrónicos*. McGraw Hill.
- Antonio Serna Ruiz, F. A. (2010). *Guía Práctica de Sensores*. Creaciones Copyright.
- Areny, R. P. (2003). *Sensores y acondicionadores de señal*. Marcombo.
- Creus, A. (2011). *Instrumentación industrial, 8ª edición*. Marcombo.
- Fuchs, P. a. (s.f.). PXV100 Datasheet.
- <https://www.researchgate.net/>. (s.f.). Principle-of-operation-of-an-optical-encoder_fig1_324777358.
- IO-Link.com. (s.f.).
- Miguel Angel Perez Garcia, J. A. (2008). *Instrumentación electrónica*. Paraninfo.
- Moreno, R. P. (2004). *Ingeniería de la automatización industrial*. Ra-Ma.
- notes, E. (s.f.). Gear basics: Backlash vs lost motion.
- OPCfoundation.org. (s.f.).
- Profibus.com. (s.f.). Profinet Standard.
- review, S. S. (s.f.).
- Salvador Martinez Garcia, J. A. (2006). *Electrónica de Potencia*. Thomson.
- Siemens. (s.f.). Automating with Sinamics S7 1500.
- Siemens. (s.f.). Programming guideline for S7 1500.
- Siemens. (s.f.). S120 drive datasheet.
- Siemens. (s.f.). S7 1500 Library.
- Siemens. (s.f.). S7 1500 Motion Control Overview programming guide.
- Siemens. (s.f.). Simatic Safety - Configuring and programming.
- Stego. (s.f.). Datasheet Stego CSS 014.
- technologies, I. (s.f.). Inductive sensing design guide.
- W.Bolton. (2001). *Ingeniería de Control*. Marcombo.