UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID





MÁSTER EN INGENIERÍA DE SISTEMAS Y CONTROL

Automatización de una Maqueta Industrial de Cuatro Tanques mediante PLC y SCADA

Autor:
Alex ESPINAL

Directores:
José SÁNCHEZ MORENO
Santiago GONZÁLEZ GONZÁLEZ

Curso:
2022 - 2023

Resumen

En el presente trabajo fin de máster se llevó a cabo la automatización de una maqueta industrial de un sistema de llenado de cuatro tanques acoplados basado en el problema de control propuesto en [3] mediante un Controlador Lógico Programable (PLC), acrónimo de Programmable Logic Controller, de la gama $S7-1500$ de la marca SIEMENS que será gobernado a través de un sistema de Control Supervisor y Adquisición de Datos (SCADA), acrónimo de Supervisory Control and Data Acquisition. El objetivo final es disponer de una interfaz que permita acceder de forma local o remota a todos los elementos que componen la planta, para poder ofertar un sistema integral para la realización de prácticas a distancia utilizando herramientas propias de entornos industriales que viene siendo la característica principal de la planta.

Debido a que la planta estaba obsoleta, descompensada e inoperativa por desuso, se ha reformado el circuito hidráulico, se han reubicado las sondas de caudal, y se han verificado y cableado todos los componentes que integran la maqueta, como son: las sondas de presión, las sondas de caudal, las bombas, las válvulas de control, las válvulas solenoides, el compresor de aire y el PLC en el cuadro eléctrico.

La programación del PLC que gobierna el proceso se realizó mediante el software de SIEMENS STEP 7 Totally Integrated Automation Portal V17 (TIA Portal V17). Este es un sofware específico que se utiliza para programar la familia de autómatas SIMATIC-S7 de SIEMENS. Por otro lado, la elaboración del sistema SCADA se realizó con el software WinCC Run Time Advanced, más conocido como WinCC RT Advanced, el cual viene integrado en TIA Portal V17.

El sistema SCADA dispone de tres modos de control: el control manual, el control descentralizado y el control centralizado. Todas estas estrategias de control están diseñadas con el propósito de que los usuarios experimenten con diferentes controladores y analicen el comportamiento del sistema.

El sistema, además, ofrece la posibilidad de visualizar la evolución de las señales principales, registrar los datos para hacer identificación, y también está

dotado de una estructura con cuatro cámaras para que el usuario pueda ver el funcionamiento de los cinco tanques de que consta.

Finalmente, se presentaron los resultados de la puesta en marcha del sistema implementando un controlador PI descentralizado e incorporando la práctica del máster modificada al repositorio.

Índice General

Pág.

Índice de Figuras **5**

Índice de Tablas **8**

1. Introducción **9**
1.1. Objetivos del proyecto 9
1.2. Estructura de la memoria 10

2. Descripción del sistema **12**
2.1. Estado original de la planta 12
2.1.1. Verificación de los elementos de la planta 13
2.2. Actualización de la planta 16
2.2.1. Solución a los problemas 16
2.3. Características de los elementos de la planta 19
2.3.1. Bastidor 19
2.3.2. Tanques 19
2.3.3. Instrumentos de medida 22
2.3.4. Actuadores 24
2.3.5. Controlador 29
2.3.6. Ordenador (sistema PC) 33
2.3.7. Sistema de cámaras 35
2.3.8. Cuadro eléctrico 36

3. Configuración y programación del PLC **40**
3.1. Configuración del hardware 40
3.1.1. Configuración de módulos 40
3.1.2. Dirección IP 46
3.1.3. Activación de marcas de sistemas y de ciclo 47
3.1.4. Direccionamiento de variables 48
3.1.5. Integridad del sistema 50

3.2. Programación 51
3.2.1. Descripción del programa 52
3.2.2. Estructura del programa 53

4. Sistema SCADA **63**
4.1. SCADA 63
4.1.1. HMI 63
4.1.2. Componentes del sistema 64
4.2. Descripción del sistema SCADA 67
4.2.1. Pantalla de control manual 67
4.2.2. Pantalla de control descentralizado 72
4.2.3. Pantalla de control centralizado 75

5. Puesta en marcha **80**
5.1. Identificación 80
5.1.1. Identificación del sistema en configuración de fase mínima. 80
5.2. Controlador PI descentralizado 82
5.2.1. Matriz de ganancias relativas (RGA) 83
5.2.2. Diseño del controlador PI descentralizado para fase mínima 84

6. Conclusiones **88**

Referencias **90**

Apéndices **92**

Índice de Figuras

2.1. Esquema de la planta. 13
2.2. La planta en su estado original. 15
2.3. Bloque de comunicaciones OPTO 22 frente al PLC S7-1500. . . . 16
2.4. Arandela original frente a la actualizada. 17
2.5. Tapa de metacrilato de T0. 17
2.6. La planta actualizada. 18
2.7. Tanque T0. 19
2.8. Tanques T1 y T2. 20
2.9. Tanques T3 y T4. 21
2.10. Sonda de presión. 22
2.11. Sonda de caudal. 23
2.12. Bomba con el módulo de expansión situado a la izquierda. 24
2.13. Válvula de control. 25
2.14. Actuador neumático. 26
2.15. Posicionador. 26
2.16. Válvula de tres vías. 26
2.17. Compresor de aire. 27
2.18. Unidad de mantenimiento. 28
2.19. Válvula solenoide. 28
2.20. CPU 1516-3 PN/DP. 29
2.21. Módulo DI 32x24VDC HF. 30
2.22. Módulo DQ 32x24VDC/0.5A HF. 31
2.23. Módulo AI 8xU/I/RTD/TC ST. 32
2.24. Módulo AQ 4xU/I ST. 33
2.25. Ordenador. 34
2.26. Switch. 35
2.27. Cable Ethernet. 35
2.28. Sistema de cámaras. 35
2.29. Cámara AXIS. 36
2.30. cable UTP. 36
2.31. Cuadro eléctrico en su estado original frente al actualizado. 37

3.1. Selección de la CPU. 41
3.2. Selección de módulos complementarios. 42
3.3. Configuración de las sondas de nivel en el módulo de entradas analógicas. 43
3.4. Configuración de las sondas de caudal en el módulo de entradas analógicas. 44
3.5. Configuración de las salidas correspondientes en el módulo de salidas analógicas. 45
3.6. Configuración de las salidas correspondientes en el módulo de salidas analógicas. 46
3.7. Configuración de la dirección IP. 47
3.8. Activación de marcas de sistema y de ciclo. 48
3.9. Tabla de variables de entradas digitales (ED). 49
3.10. Tabla de variables de salidas digitales (SD). 49
3.11. Tabla de variables de entradas analógicas (EA). 50
3.12. Tabla de variables de salidas analógicas (SA). 50
3.13. Estructura del control descentralizado. 52
3.14. Estructura del control centralizado. 53
3.15. Estructura del compensador. 53
3.16. Estructura de llamadas del PLC. 54
3.17. Ejecución cíclica del OB1. 55
3.18. Árbol del proyecto. 56
3.19. 00_RECABLEADO. 57
3.20. 00_MANIOBRA_HMI. 57
3.21. 02_FUNCIONES. 58
3.22. 03_PROCEDIMIENTOS. 61

4.1. Selección del sistema PC. 65
4.2. Configuración de la dirección IP del sistema PC. 66
4.3. Red de comunicación industrial PROFINET. 67
4.4. Pantalla de control manual. 68
4.5. Encabezado. 69
4.6. Sección de maniobra. 69
4.7. Sección de evolución. 71
4.8. Pie. 71
4.9. Pantalla de control descentralizado. 72
4.10. Control descentralizado. 73
4.11. Panel de visualización. 74
4.12. Panel de perturbaciones. 74
4.13. Sección de evolución. 75
4.14. Pantalla de control centralizado. 76

4.15. Panel de control centralizado. 78
4.16. Sección de evolución. 79

5.1. Comparación del nivel real de N1 en lazo abierto frente al modelo identificado en configuración de fase mínima. 81
5.2. Comparación del nivel real de N2 en lazo abierto frente al modelo identificado en configuración de fase mínima. 81
5.3. Sistema visto como dos lazos independientes. 84
5.4. Respuesta del sistema ante entrada escalón gobernado por dos controladores PI descentralizados. 85
5.5. Respuesta del sistema ante los efectos de abrir Y2 y Y4. 86
5.6. Respuesta del sistema ante los efectos de abrir Y1 y Y3. 87

Índice de Tablas

2.1. Comparativa de caudales máximos antes y después de la actualización. 19
2.2. Dimensiones de T0. 20
2.3. Dimensiones de T1 y T2. 21
2.4. Dimensiones de T3 y T4. 22
2.5. Placa de características de la sonda de presión. 23
2.6. Placa de características de la sonda de caudal. 24
2.7. Placa de características de la bomba. 25
2.8. Placa de características del compresor. 27
2.9. Placa de características de la válvula solenoide. 28
2.10. Placa de características del ordenador. 34
2.11. Placa de características del cuadro eléctrico. 36
2.12. Colores de cables por circuito. 38

5.1. Parámetros de los dos controladores PI. 84

Capítulo 1

Introducción

En el campo de la ingeniería de control se ha puesto mucho esfuerzo en el estudio de los sistemas de cuatro tanques, una de las plantas de laboratorio más conocidas en el contexto del control multivariable (MIMO), acrónimo de Multi Input Multi Output. Ello se debe a que es un proceso con dinámica no lineal donde se pueden ilustrar situaciones con mayor o menor grado de interacción y con comportamientos de fase mínima y no mínima, lo cual resulta bastante atractivo para el ámbito de la enseñanza.

Actualmente, además de la UNED hay varias universidades españolas que tienen este tipo de maqueta elaborada con componentes industriales, como son: la Universidad de Almería, la Universidad de León y la Universidad de Oviedo. Las maquetas de estas universidades no cuentan con caudalímetros analógicos para medir el caudal que entra a cada tanque y sólo tienen sondas de nivel, disponen de PLC obsoletos e interfaces muy básicas, lo cual, limita al usuario a la hora de experimentar con la planta. Por otra parte, hay otras universidades que también cuentan con maquetas de cuatro tanques, pero a una escala mucho más reducida y sin instrumentación de tipo industrial.

Inicialmente, a la llegada al Departamento de Informática y Automática (DIA) de la UNED la planta estaba inoperativa, el cuadro eléctrico cableado de forma incorrecta, estaba falta de aparellaje, con un bloque de comunicaciones descatalogado, un caudalímetro roto, bombas desajustadas, una válvula distribuidora de control atascada, estructura de tuberías mal diseñada y con un sistema de cámara inadecuado de cara a la visualización remota.

1.1. Objetivos del proyecto

El objetivo general de este proyecto ha sido actualizar todo el sistema y disponer de una interfaz que permita acceder de forma local o remota a todos los

elementos que componen la planta, para poder ofertar un sistema integral para la realización de prácticas a distancia.

Para poder lograr el objetivo general se tienen que llevar a cabo los siguientes objetivos específicos:

- Sustituir el bloque de comunicaciones actual.
- Comprobar todo el aparejalle, instrumentación y actuadores de la planta.
- Reformar el circuito hidráulico y reubicar las sondas de caudal.
- Cablear todo el aparejalle, instrumentación y actuadores en el cuadro eléctrico.
- Desarrollar un programa en el PLC para el control de la planta.
- Diseñar un sistema SCADA que permita el acceso local o remoto a la planta.
- Poner en marcha la planta e implementar una estrategia de control MIMO.

1.2. Estructura de la memoria

La memoria de este proyecto está organizada de la siguiente forma:

- **Capítulo 1:** Se realiza la introducción, se plantean los objetivos y se detalla la estructura de la memoria.
- **Capítulo 2:** En este capítulo se hace una descripción de la planta en su estado original y se explica su funcionamiento, se verifican todos sus elementos, se actualiza la planta y se detallan todos los nuevos elementos que la componen.
- **Capítulo 3:** Se lleva a cabo la configuración del PLC con todos los módulos que lo componen y se explica el desarrollo del programa que controla la planta y todos sus modos de funcionamiento.
- **Capítulo 4:** Este capítulo se encarga de explicar detalladamente el diseño del sistema SCADA y cómo maniobrar la planta a través de la interfaz.
- **Capítulo 5:** Se pone en marcha la instalación desde el sistema SCADA, implementando un controlador PI descentralizado y mostrando los resultados.
- **Capítulo 6:** Se exponen las conclusiones a las que se ha llegado en la realización de este trabajo.

- **Referencias:** Se referencias las fuentes consultadas para la realización de este proyecto.
- **Apéndice:** Contiene el código del programa del PLC y los esquemas eléctricos de la instalación.

Capítulo 2

Descripción del sistema

La planta consiste en un proceso hidráulico de cuatro tanques acoplados inspirado en el laboratorio de cuatro tanques propuesto en [3]. A continuación, se describe el sistema.

2.1. Estado original de la planta

La planta original que está en el laboratorio del DIA es una maqueta de laboratorio que ha sido diseñada para probar técnicas de control e identificación de sistemas utilizando un bloque de comunicaciones OPTO 22 SNAP-UP1-ADS manejado por el usuario de forma local o remota a través de una interfaz desarrollada con la herramienta Easy Java Simulations (Ejs) y que, además, cuenta con una cámara para observar el funcionamiento de la misma. Un esquema de la planta de cuatro tanques se muestra en la Figura 2.1.

Como se puede observar en la Figura 2.1, la maqueta está compuesta por dos tanques inferiores (T1, T2) que desaguan en el tanque principal (T0) y dos superiores (T3, T4) que desaguan en los tanques inferiores. Los tanques se llenan con dos bombas (bI, bD) con caudal variable (cI, cD) que succionan el agua del tanque T0 que es fuente y sumidero del agua que circula en el sistema. Las válvulas distribuidoras de control (yI, yD) distribuyen el agua que circula entre los tanques inferiores y superiores. Las sondas de nivel (N1, N2, N3, N4) miden el nivel de los tanques y las sondas de caudal (C1, C2, C3, C4) miden sus respectivos caudales. Las perturbaciones del sistema se efectúan mediante las válvulas solenoides (Y1, Y2, Y3, Y4). La válvula de bola (Y0) sirve para el desagüe de T0.

Además, se puede ver que la planta conserva una estructura similar a la planta propuesta en [3], pero se ha actualizada para obtener mejor rendimiento a la hora de implementar cualquier tipo de estrategia de control, tal y como se explica en la siguiente sección.

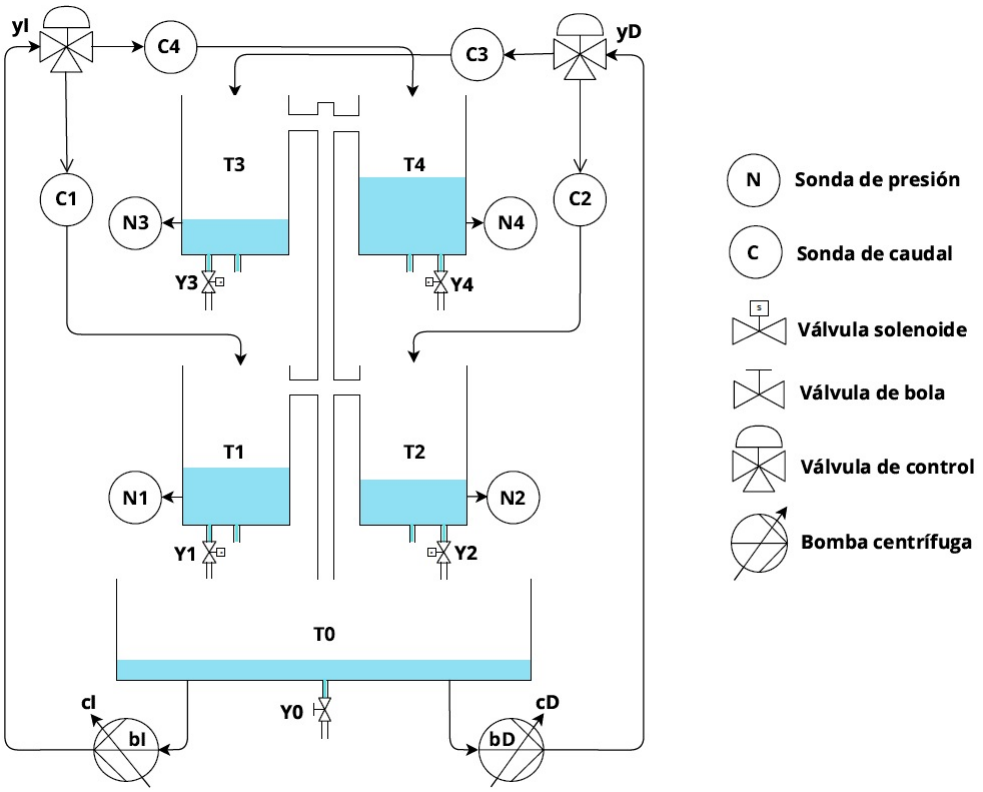


Figura 2.1: Esquema de la planta.

2.1.1. Verificación de los elementos de la planta

Tras un meticuloso proceso de inspección de cada uno de los elementos presentes en la planta en su estado original se han encontrado los siguientes problemas:

- **Bloque de comunicaciones y sistema SCADA:** El bloque de comunicaciones está descatalogado, y el sistema SCADA obsoleto y fuera de servicio.
- **Bombas:** Tras poner en marcha las bombas se comprueba que la bomba bI tiene mayor potencia que la bomba bD a pesar de que tienen las mismas características indicando que están desajustadas. Asimismo, se ponen en marcha al $100\ \%$ de su potencia por un periodo de $30\,\mathrm{s}$ para calcular el caudal por el método volumétrico, y haciendo varios ensayos se comprueba que la bI tiene un caudal de $226{,}68\,\mathrm{cm}^3/\mathrm{s}$ y que la bD tiene un caudal de $224{,}73\,\mathrm{cm}^3/\mathrm{s}$.

- **Tubos de desagüe de T1 y T2:** Se detecta que para que las bombas no caviten hay que mantener el T0 con un nivel mínimo de $15\,\mathrm{cm}$. Por otro lado, si el nivel de líquido en T0 cubre los tubos de desagües, estos cogen aire y el agua no sube a T1 y T2. Asimismo, si el nivel de T0 cubre los tubos hace que el vaciado de T1 y T2 sea más lento porque se ejerce una presión en la salida y esto cambia la dinámica del sistema.

- **Sección de los orificios de los tanques:** La sección de los orificios se fijan mediante arandelas de acero, pero se ha verificado que los orificios no tienen forma circular, sino, más bien, forma octogonal. Esta situación produce un desequilibrio en la planta afectando gravemente la dinámica del sistema.

- **Circuito hidráulico:** Se revisa la configuración del circuito hidráulico y se detecta que hay curvas, conexiones y reducciones con distintas secciones ($18\,\mathrm{mm}^2$ y $20\,\mathrm{mm}^2$), tubos de distintos materiales (cobre y acero) y las sondas de caudal están mal ubicadas. Esta situación limita el caudal en T3 y T4, principalmente, y produce desnivel en todo el sistema.

- **Válvulas de distribución de control:** Tras poner en marcha yI y yD se observa que no sale el líquido por una de las vías de yD, impidiendo trabajar con T3 y, además, se encuentran mal calibradas.

- **Cableado y elementos de seguridad:** El cableado de las sondas de caudal, gran parte del cableado del cuadro y los elementos de seguridad de los actuadores no son los adecuados según el reglamento electrotécnico de baja tensión.

- **Sondas de presión:** La placa de características de esta sonda (véase la Tabla 2.5) indica que la lectura mínima es de $50\,\mathrm{mmH_2O}$ pero los tanques inferiores pueden llegar a tener una presión máxima de $250{,}35\,\mathrm{mmH_2O}$ y los superiores de $200{,}46\,\mathrm{mmH_2O}$ teniendo en cuenta todo su volumen. Por ello, las sondas están sobredimensionadas, es decir, la sonda comienza a medir correctamente a partir de un nivel, de aproximadamente, $5\,\mathrm{cm}$ en todos los tanques cuando el rango de niveles va de $0\,\mathrm{cm}$ a $18{,}9\,\mathrm{cm}$ en T1 y T2 y de $0\,\mathrm{cm}$ a $13{,}6\,\mathrm{cm}$ en T3 y T4.

- **Sondas de caudal:** Tras poner en marcha la planta y verificar las mediciones de los distintos caudales, se observa que los valores no se corresponden con lo real indicando que las sondas están mal calibradas.

- **Óxido:** El haber utilizado como fluido agua sin ningún tipo de aditivo químico está produciendo la aparición de bastante óxido en los tanques de acero y, además, conlleva al deterioro de todos los elementos.

- **T0 sin tapa:** Esto provoca que el líquido se evapore bastante rápido. Este inconveniente origina que el nivel de T0 no sea el adecuado para trabajar porque las bombas cavitan.
- **Filtración en T1:** Observando el llenado de T1 se verifica que hay filtraciones en la parte inferior de la cara frontal de metacrilato.
- **Una sola cámara:** Esta situación dificulta la correcta visualización de la planta en modo remoto, puesto que una cámara no es suficiente.
- **Indicadores de nivel:** Los indicadores de nivel de los tanques son muy pequeños impidiendo una adecuada visualización de la planta al conectarse para operar de forma remota.
- **Falta de señalización:** Los elementos de la planta y todo el aparellaje del cuadro eléctrico están sin señalizar.

En la Figura 2.2 se muestra el estado original de la planta al inicio del proyecto. Obsérvese la presencia de abundante óxido en los tanques y en los caudalímetros presentes en la planta.



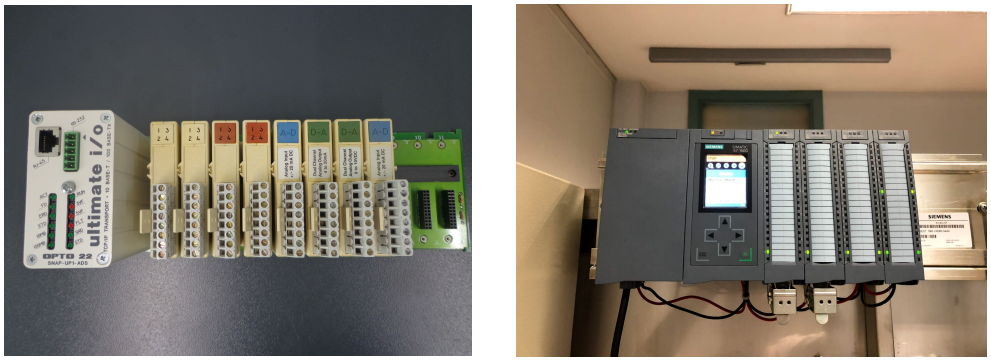
Figura 2.2: La planta en su estado original.

2.2. Actualización de la planta

Puesto que, el estado original de la maqueta no era el adecuado para lograr los objetivos perseguidos en este proyecto, se decide actualizar la planta original y resolver cada uno de los problemas expuestos previamente.

2.2.1. Solución a los problemas

- **Bloque de comunicaciones y sistema SCADA:** Se sustituye el bloque de comunicaciones OPTO 22 SNAP-UP1-ADS y las interfaces de control local y remoto por un PLC y un sistema SCADA industrial como nueva interfaz de mando. En la Figura 2.3 se muestra el bloque de comunicaciones descatalogado y los conversores A/D y D/A frente al PLC.



(a) OPTO 22 (descatalogado). (b) PLC S7-1500 de SIEMENS.

Figura 2.3: Bloque de comunicaciones OPTO 22 frente al PLC S7-1500.

- **Tubos de desagües de T1 y T2:** Se ha decido cortar los tubos de desagüe para que no queden cubiertos por el agua y se produzca el fenómeno de frenado en el desagüe por burbujas de aire acumulado. De este modo, al mantener a T0 con su nivel adecuado se evita que las bombas caviten garantizando que el caudal suba a T1 y T2 y el vaciado de los mismos se produzca conforme a la dinámica del sistema.
- **Circuito hidráulico:** Se cambian todas las tuberías con una misma sección de $15\,\mathrm{mm}^2$, menor a la anterior de material de cobre de $18\,\mathrm{mm}^2$ y acero de $20\,\mathrm{mm}^2$. Asimismo, se eliminan todas las reducciones y conexiones innecesarias y se reubican las sondas de caudal.
- **Bombas:** Se decide mantener las bombas dado que no hay presupuesto para su reemplazo.

- **Sección de los orificios de los tanques:** Se sustituyeron las arandelas de acero por arandelas de metacrilato con las secciones de los orificios correctas, (véase la Figura 2.4).



(a) Arandela original con orificio irregular.

(b) Arandela actual con orificio regular.

Figura 2.4: Arandela original frente a la actualizada.

- **Válvulas de distribución de control:** Se desmonta yD y se observa que el émbolo lleva una membrana que se quedaba atascada en la válvula por desuso. Se desatasca y yD funciona correctamente. También se calibran correctamente.
- **Cableado y elementos de seguridad:** Este proceso se describirá con detalle en la sección relativa al cuadro eléctrico.
- **Sondas de presión:** Se decide trabajar con consignas por encima de los $5\,\mathrm{cm}$ para garantizar precisión en la lectura de los niveles.
- **Sondas de caudal:** Una vez reubicadas en la nueva configuración del circuito hidráulico y tras ser calibradas, las sondas miden con precisión.
- **T0 sin tapa:** Se manda fabricar una tapa de metacrilato para reducir de forma significativa la evaporación del líquido y garantizar que T0 se mantenga en el nivel adecuado, (véase la Figura 2.5).

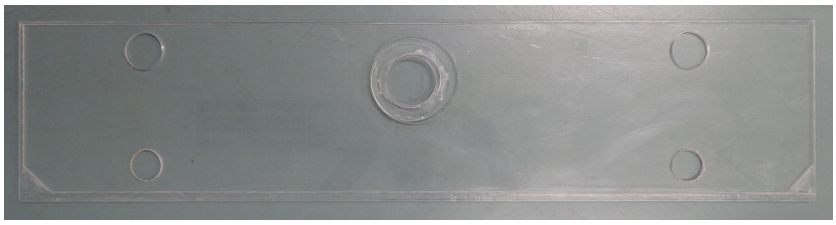


Figura 2.5: Tapa de metacrilato de T0.

- **Óxido:** Se ha mezclado 30 l de agua con 15 l de anticongelante (tres garrafas de 5 l) para proteger la planta contra la oxidación y prevenir la formación de espuma.
- **Filtración en T1:** Se sella toda la parte inferior de la cara frontal con silicona y se repasan los demás tanques para evitar futuras filtraciones.
- **Una sola cámara:** Se fabrica un bastidor con perfiles de aluminio donde se montan cuatro cámaras para visualizar los cinco tanques de forma remota.
- **Indicadores de nivel:** Se sustituyen los indicadores de nivel actuales por otros más grandes, se plastifican para mejor protección frente al líquido y se cambian de posición. Con el nuevo sistema de cámaras y estos niveles se garantiza una mejor visualización de la planta de forma remota.
- **Falta de señalización:** Este proceso se describirá con detalle en la sección relativa al cuadro eléctrico.

En la Figura 2.6 se ilustra la planta después de ser actualizada.



Figura 2.6: La planta actualizada.

Con esta nueva configuración se han logrado equilibrar y aumentar los caudales máximos, especialmente en T3 y T4, (véase la Tabla 2.1).

Tabla 2.1: Comparativa de caudales máximos antes y después de la actualización.

Tanque	**Antes**	**Después**
T_1	$226{,}68\,\mathrm{cm}^3/\mathrm{s}$	$204{,}24\,\mathrm{cm}^3/\mathrm{s}$
T_2	$224{,}73\,\mathrm{cm}^3/\mathrm{s}$	$214{,}40\,\mathrm{cm}^3/\mathrm{s}$
T_3	$141{,}45\,\mathrm{cm}^3/\mathrm{s}$	$199{,}08\,\mathrm{cm}^3/\mathrm{s}$
T_4	$178{,}78\,\mathrm{cm}^3/\mathrm{s}$	$191{,}22\,\mathrm{cm}^3/\mathrm{s}$

2.3. Características de los elementos de la planta

2.3.1. Bastidor

Es un armazón de acero inoxidable de $2\,\mathrm{m}$ de alto y $2\,\mathrm{m}$ de ancho apoyado en cuatro ruedas donde se han montado los depósitos, tuberías, instrumentos de medida, accionamientos, PLC y armario eléctrico.

2.3.2. Tanques

Los cinco tanques de la planta se clasifican en tres grupos, tal y como se explica a continuación.

T0:

Es un tanque con forma de paralelepípedo rectangular horizontal de acero inoxidable, con cara frontal y tapa superior de metacrilato, que sirve de fuente y sumidero del agua que circula en el sistema.

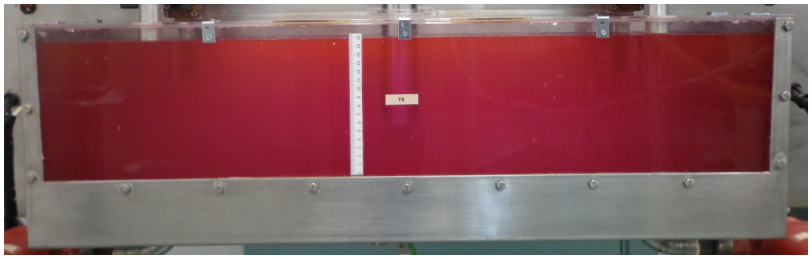


Figura 2.7: Tanque T0.

El tanque cuenta con una tapa superior de metacrilato, un indicador de nivel y dos bombas conectadas en los extremos de la cara inferior que impulsan el líquido al sistema. En el centro de la base tiene conectada la válvula de bola que sirve de desagüe, (véase la Figura 2.7).

Es muy importante que antes de poner en marcha la planta, el nivel de líquido que debe tener el tanque para que las bombas no caviten es de $15\,\mathrm{cm}$. En la Tabla 2.1 se presentan las dimensiones de T0.

Tabla 2.2: Dimensiones de T0.

Característica	**Valor**	**Unidad**
Altura	26,50	cm
Base	90,35	cm
Profundidad	20,00	cm
Nivel de trabajo	15,00	cm
Sección transversal	1807,00	cm^2
Sección del desagüe	0,38	cm^2
Volumen	47885,50	cm^3

T1 y T2:

Son tanques con forma de paralelepípedo rectangular vertical de acero inoxidable, con cara frontal de metacrilato que cuenta con indicador de nivel en centímetros, sonda de nivel, una válvula solenoide para introducir perturbaciones y un rebosadero.



Figura 2.8: Tanques T1 y T2.

Las entradas de los tanques provienen de las válvulas yI y yD o de las per-

turbaciones Y3 y Y4. La salida de los tanques se efectúa a través de un orificio con una sección predeterminada. La altura medida en estos tanques corresponde a la salida del sistema, (véase la Figura 2.8). En la Tabla 2.2 se muestran las dimensiones de T1 y T2.

Tabla 2.3: Dimensiones de T1 y T2.

Característica	**Valor**	**Unidad**
Altura	25,10	cm
Base	20,90	cm
Profundidad	18,70	cm
Altura del rebosadero	20,50	cm
Nivel de trabajo	$0{,}00 - 18{,}80$	cm
Sección transversal	390,83	cm^2
Sección del desagüe	1,54	cm^2
Sección del orificio de Y1 e Y2	0,95	cm^2
Sección del rebosadero	11,34	cm^2
Volumen	9809,83	cm^3

T3 y T4:

Son tanques con forma de paralelepípedo rectangular vertical de acero inoxidable, con cara frontal de metacrilato que cuenta con indicador de nivel en centímetros, sonda de nivel, una válvula solenoide para introducir perturbaciones y un rebosadero.



Figura 2.9: Tanques T3 y T4.

Las entradas de los tanques provienen de las válvulas yI y yD. La salida de los tanques se efectúa a través de un orificio con sección determinada. Estos tanques

son utilizados para perturbar T1 y T2, principalmente, (véase la Figura 2.9). En la Tabla 2.3 se muestran las dimensiones de T3 y T4.

Tabla 2.4: Dimensiones de T3 y T4.

Características	**Valor**	**Unidad**
Altura	20,10	cm
Base	20,90	cm
Profundidad	18,80	cm
Altura del rebosadero	15,50	cm
Nivel de trabajo	$0{,}00 - 13{,}60$	cm
Sección transversal	392,92	cm^2
Sección del desagüe	1,33	cm^2
Sección del orificio de Y3 e Y4	0,95	cm^2
Sección del rebosadero	11,34	cm^2
Volumen	7897,69	cm^3

2.3.3. Instrumentos de medida

El sistema cuenta con dos tipos de sondas que se explican a continuación.

Sonda de presión:

Es un medidor de presión con sensores de cerámica y metal que mide la presión absoluta y la relativa en gases, vapores o líquidos en todas las áreas de ingeniería de procesos y tecnología de medición de procesos.



Figura 2.10: Sonda de presión.

Esta sonda va acoplada en la cara lateral de los tanques y proporciona una salida analógica de $4-20\,\mathrm{mA}$ con protocolo HART (acrónimo de Highway Addressable Remote Transducer) superpuesto a dos hilos, que será linealmente proporcional a un rango que se debe calibrar. Para calibrar la sonda hay que conocer el nivel máximo deseado en el tanque, entonces a ese valor se le asigna el valor de $20\,\mathrm{mA}$ y al nivel mínimo el valor de $4\,\mathrm{mA}$. Cabe mencionar que estas sondas fueron calibrados originalmente por el proveedor de la maqueta. En la Tabla 2.5 se muestran las características de la sonda.

Tabla 2.5: Placa de características de la sonda de presión.

Marca	Endress+Hauser
Modelo	Cerabar PMC731-R51C3M11M1
Presión	$50-40\,000\,\mathrm{mmH2O}$
Salida analógica	$4-20\,\mathrm{mA}$
Tensión	$11{,}5-45\,\mathrm{VCC}$

Sonda de caudal:

Es un medidor de caudal de turbina posicionado a la entrada de cada tanque. La sonda es de tres hilos y con una salida analógica de $4-20\,\mathrm{mA}$.



Figura 2.11: Sonda de caudal.

Para calibrar la sonda hay que conocer el caudal máximo que entra al tanque desde la vía correspondiente de la válvula, entonces a ese valor se le asigna el valor de $20\,\mathrm{mA}$ y al caudal mínimo el valor de $4\,\mathrm{mA}$. Por tanto, el caudal máximo que entregan las bombas a T1 y T2 a través de la vía A de la válvula distribuidora es de $(204{,}24,\ 214{,}40)\ \mathrm{cm}^3/\mathrm{s}$, por lo que, le corresponde el valor de $20\,\mathrm{mA}$. Del

mismo modo, el caudal máximo que entregan las bombas a T3 y T4 a través de la vía B es de (199,08, 191,22) cm^3/s, por tanto, le corresponde el valor de $20\,\mathrm{mA}$. El caudal mínimo para todos los tanques es de $0\,\mathrm{cm}^3/\mathrm{s}$, por lo que, se le asigna el valor de $4\,\mathrm{mA}$. En la Tabla 2.6 se muestran las características de la sonda.

Tabla 2.6: Placa de características de la sonda de caudal.

Marca	Parker
Modelo	DFT990
Caudal	$0-100\,\mathrm{l/min}$
Salida analógica	$4-20\,\mathrm{mA}$
Tensión	$24\,\mathrm{VCC}$

2.3.4. Actuadores

La planta dispone de tres de actuadores que se describen a continuación.

Bomba:

Es una bomba centrífuga con control de la presión diferencial integrado que permite ajustar la actuación de la bomba a las necesidades del sistema. En la Tabla 2.7 se presentan las características de la bomba.



Figura 2.12: Bomba con el módulo de expansión situado a la izquierda.

De entre todas las funciones que ofrece la bomba, se optará por la siguiente configuración que se efectúan en el módulo de expansión MC 40/60 que lleva incorporado la bomba a su izquierda, (véase la Figura 2.12).

- **Control de la presión constante:** Se mantiene una altura constante, independientemente de la demanda de caudal. La altura deseada puede ajustarse en el panel de control de la bomba. Por tanto, se ajusta la bomba a la altura máxima de $4\,\mathrm{m}$ para aprovechar el máximo caudal.
- **Señal externa de fallo:** Por medio de una salida conectada al módulo de entrada del PLC se puede saber si la bomba está en fallo.
- **Control externo analógico:** Permite controlar el caudal de la bomba mediante una señal analógica $0-10\,\mathrm{VCC}$ a través del módulo de salidas analógicas del PLC.

Tabla 2.7: Placa de características de la bomba.

Marca	Grundfos
Modelo	UPE 25-40
Líquido bombeado	Agua
Caudal real calculado	$1{,}768\,\mathrm{m^3/h}$
Altura resultante	$2{,}155\,\mathrm{m}$
Potencia	$20-60\,\mathrm{W}$
Tensión	$230-240\,\mathrm{V}\ 50\,\mathrm{Hz}$

Válvula de control:

Es una válvula distribuidora de control compuesta por un actuador neumático, un posicionador y una válvula de tres vías, como se presenta en la Figura 2.13.



Figura 2.13: Válvula de control.

El actuador neumático tipo $2780-2$ lineal de simple efecto para válvulas de control para procesos industriales, máquinas e instalaciones de calefacción, ventilación y climatización. Para que el actuador pueda abrir o cerrar completamente la válvula requiere una señal de $0{,}4-2\,\mathrm{bar}$, (véase la Figura 2.14).



Figura 2.14: Actuador neumático.

El posicionador tipo 3760 garantiza una relación entre la posición de la válvula y la señal de mando. Para ello comparan la señal de mando $4-20\,\mathrm{mA}$ y envía como señal de salida una presión al actuador, (véase la Figura 2.15).



Figura 2.15: Posicionador.

La válvula de tres vías tipo 3226 es una válvula distribuidora con conexión de rosca macho en los extremos, (véase la Figura 2.16).



Figura 2.16: Válvula de tres vías.

Para que fluya el líquido desde la entrada de la válvula a la vía A se asigna en el posicionador $4\,\mathrm{mA}$, y para que el líquido fluya por la vía B se asigna $20\,\mathrm{mA}$.

Compresor de aire:

Es un compresor de pistón insonorizado, fiable, compacto y robusto, de fácil acceso, mantenimiento económico, motor eléctrico de bajo consumo y alto rendimiento utilizado para accionar los actuadores de las válvulas de control yI y yD, (véase la Figura 2.17). En la Tabla 2.8 se muestran sus características.



Figura 2.17: Compresor de aire.

Tabla 2.8: Placa de características del compresor.

Marca	JOSVAL
Modelo	brisa 310-M
Depósito interior	$50\,\mathrm{l}$
Presión	$10\,\mathrm{bar}$
Potencia	$1{,}5\,\mathrm{Kw}$
Tensión	$230\,\mathrm{V}$ $50\,\mathrm{Hz}$
Peso	$112\,\mathrm{Kg}$

Asimismo, se ha incorporado una unidad de mantenimiento neumático para depurar el aire comprimido y regular la presión entregada por el compresor a $2\,\mathrm{bar}$ ya que, los actuadores de las válvulas de control yI y yD funcionan con una presión de $0{,}4 - 2\,\mathrm{bar}$. La unidad de mantenimiento neumático cuenta con filtro, regulador, manómetro y llave de corte de aire, (véase la Figura 2.18).



Figura 2.18: Unidad de mantenimiento.

Válvula solenoide:

Se trata de una válvula de dos vías y dos posiciones con rosca G de $0{,}5\,\mathrm{pulgadas}$, una bobina de $24\,\mathrm{VCC}$ y una carcasa de latón. La posición del circuito de la electroválvula es normalmente cerrada, lo que significa que la válvula se abre cuando se le aplica tensión, (véase la Figura 2.19).



Figura 2.19: Válvula solenoide.

Tabla 2.9: Placa de características de la válvula solenoide.

Marca	SMC
Modelo	VXZ2240-04F-5D-Q
Tensión	$24\,\mathrm{VCC}$
Sección del orificio	$1{,}77\,\mathrm{cm}^2$
Presión diferencial (agua)	$0 - 0{,}7\,\mathrm{MPa}$

2.3.5. Controlador

El controlador o Unidad Central de Proceso (CPU) que se va a utilizar es un SIEMENS S7-1500 modelo 1516-3 PN/DP con referencia 6ES7 516-3AN01-0AB0 y versión de firmware V2.0. Está montado en un perfil ubicado en la cara trasera superior central del bastidor de la planta. Su función es la de ejecutar las instrucciones del programa. Es un sistema de control modular para un gran número de aplicaciones de automatización discreta [7]. Es una solución rentable y cómoda para las tareas más diversas que ofrece las ventajas:

- Diseño modular y sin ventilador.
- Implementación sencilla de estructuras descentralizadas.
- Manejo sencillo.

La Figura 2.17 muestra la CPU 1516-3 PN/DP.



Figura 2.20: CPU 1516-3 PN/DP.

Diseño y manejo

Todas las CPU de la familia de productos SIMATIC S7-1500 disponen de un display con información en texto explícito. El display ofrece al usuario información relativa a las referencias, las versiones de firmware y los números de serie de todos los módulos conectados. Además, la dirección IP de la CPU y otros ajustes de red pueden configurarse directamente in situ sin programadora. El display muestra los mensajes de error directamente en texto explícito.

El cableado del sistema para módulos de señales digitales permite una conexión rápida y clara con sensores y actuadores de campo (conexión totalmente

modular formada por módulos de conexión frontal, cables de conexión y módulos de conexión), además de un cableado sencillo dentro del armario eléctrico (conexión flexible formada por conectores frontales con conductores individuales conectorizados).

Características del hardware

- Módulo central con memoria de trabajo de 1 Mbyte para programa y 5 Mbytes para datos.
- **Alimentación:** La CPU se alimenta con 24 VCC a través del conector de 4 polos situado en la parte inferior.
- **PROFINET IO:** La interfaz tiene dos puertos. Además de la funcionalidad básica PROFINET, también soporta PROFINET IO RT (Real Time) e IRT (Isochronous Real Time).
- **PROFIBUS DP:** La interfaz sirve para la conexión a una red PROFIBUS.
- **Consumo (valor nominal):** $0{,}87\,\mathrm{A}$.

Composición

Módulo de entradas digitales

Este módulo permite conectar las señales digitales del proceso al PLC. La función del módulo es recibir las señales todo o nada de la planta [8].



Figura 2.21: Módulo DI 32x24VDC HF.

El módulo de entradas digitales instalado es el DI 32x24VDC HF con referencia 6ES7 521-1BL00-0AB0 y versión de firmware V2.0, como se muestra en la Figura 2.21.

Características:

- 32 entradas digitales, con aislamiento galvánico en grupos de 16.
- Tensión nominal de entrada $24\,\mathrm{VCC}$.
- Adecuado para interruptores y detectores de proximidad a 2, 3 ó 4 hilos.
- Consumo máximo de $40\,\mathrm{mA}$.

Módulo de salidas digitales

Este módulo permite emitir señales digitales del PLC al proceso. Su función es la activación de los actuadores de la planta [9].



Figura 2.22: Módulo DQ 32x24VDC/0.5A HF.

El módulo de salidas digitales instalado es el DQ 32x24VDC/0.5A HF con referencia 6ES7 522-1BL01-0AB0 y versión de firmware V1.0, como se muestra en la Figura 2.19.

Características:

- 32 salidas digitales, con aislamiento galvánico en grupos de 8.
- Tensión nominal de salida $24\,\mathrm{VCC}$.
- Corriente nominal de salida $0{,}5\,\mathrm{A}$ por canal.
- Consumo máximo de $60\,\mathrm{mA}$.
- Adecuado para electroválvulas, contactores de corriente continua y lámparas de señalización.

Módulo de entradas analógicas

Este módulo permite recibir señales analógicas de las sondas del proceso y comunicarlas al PLC [10].



Figura 2.23: Módulo AI 8xU/I/RTD/TC ST.

El módulo de entradas analógicas instalado es el AI 8xU/I/RTD/TC ST con referencia 6ES7 531-7KF00-0AB0 y versión de firmware V2.0, como se muestra en la Figura 2.23.

Características:

- 8 entradas analógicas.
- Tipo de medición: Tensión configurable canal a canal.
- Tipo de medición: Intensidad configurable canal a canal.
- Resolución 16 bits incluido signo.
- Tensión nominal de salida $24\,\mathrm{VCC}$.
- Corriente nominal de salida $0{,}5\,\mathrm{A}$ por canal.
- Consumo máximo de $240\,\mathrm{mA}$.

Módulo de salidas analógicas

Este módulo permite emitir señales analógicas del PLC al proceso. Su función es la activación de los actuadores variables de la planta [11].



Figura 2.24: Módulo AQ 4xU/I ST.

El módulo de salidas analógicas instalado es el AQ 4xU/I ST con referencia 6ES7 532-5HD00-0AB0 y versión de firmware V2.0, como se muestra en la Figura 2.24.

Características:

- 4 salidas analógicas.
- Selección de salida de tensión canal a canal.
- Selección de salida de intensidad canal a canal.
- Resolución 16 bits incluido signo.
- Tensión nominal de salida $24\,\mathrm{VCC}$.
- Consumo máximo de $190\,\mathrm{mA}$.

2.3.6. Ordenador (sistema PC)

El ordenador se utiliza como Interfaz Hombre Máquina (HMI), acrónimo en inglés de Human Machine Interface para ejecutar el sistema SCADA y controlar la planta de forma local, (véase la Figura 2.25). En la Tabla 2.10 se presentan las características del ordenador.

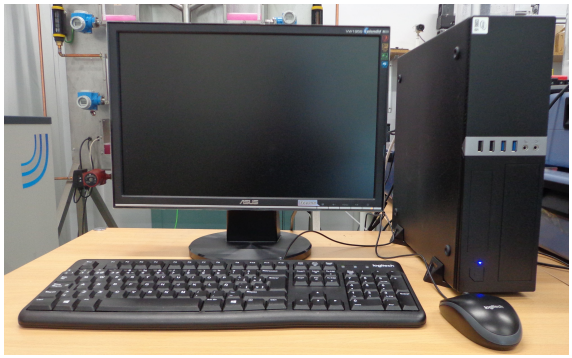


Figura 2.25: Ordenador.

Tabla 2.10: Placa de características del ordenador.

Fabricante	Gibabyte Technology Co., Ltd.
Modelo	H410M S2H V3
Tipo de sistema	PC basado en x64
Procesador	Intel(R) Core(TM) i5-10400 2,90 GHz
Memoria RAM	8 GB
Disco duro	1 TB
Sistema operativo	Windows 10 Pro 22H2

El ordenador cuenta con los siguientes programas para la realización del proyecto:

- TIA Portal V17: Software de SIEMENS que integra todos los componentes de las máquinas para controlar los procedimientos y las operaciones.
- LaTeX: Sistema de composición de textos, orientado a la creación de documentos escritos que presenten una alta calidad tipográfica.
- MATLAB: Sistema de cómputo numérico que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio.
- Microsoft Office: Conjunto de herramientas destinadas a la creación, edición, almacenamiento y transmisión de información desde ordenadores personales.

El PC comunica con el autómata a través de un switch de la marca NETGEAR modelo GS724TP, como el que se muestra en la Figura 2.26



Figura 2.26: Switch.

El PLC y el switch se conectan mediante un cable Ethernet RJ45 CAT6a industrial de la marca SIEMENS de $6\,\mathrm{m}$ modelo 6XV18703RH60, similar al que se muestra en la Figura 2.27.



Figura 2.27: Cable Ethernet.

2.3.7. Sistema de cámaras

Debido a la necesidad de visualizar la planta de forma remota de manera eficiente se ha fabricado un bastidor con perfiles de aluminio para montar cuatro cámaras. El bastidor tiene unas dimensiones de $185{,}8\,\mathrm{cm}$ de alto, $107{,}5\,\mathrm{cm}$ de ancho y $60{,}5\,\mathrm{cm}$ de profundidad, (véase la Figura 2.28).

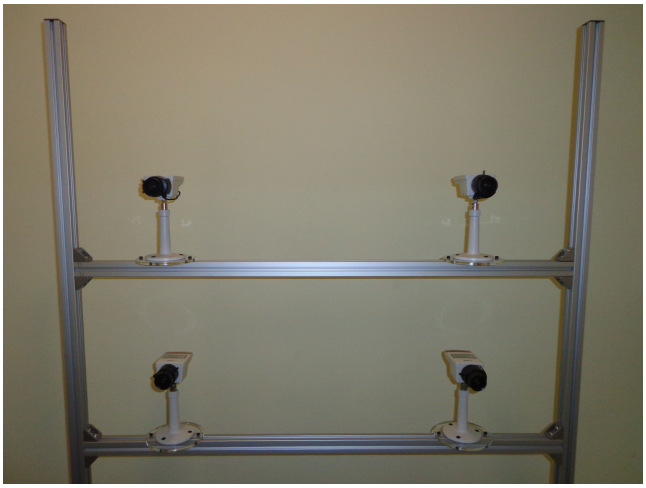


Figura 2.28: Sistema de cámaras.

Las cámaras empleadas son de la marca AXIS modelo M1113, como se muestra en la Figura 2.29.



Figura 2.29: Cámara AXIS.

Las cámaras van conectadas al switch NETGEAR mediante cable Cat5 RJ45 del tipo par trenzado o (UTP), acrónimo de Unshielded Twisted Pair, (véase la Figura 2.30).



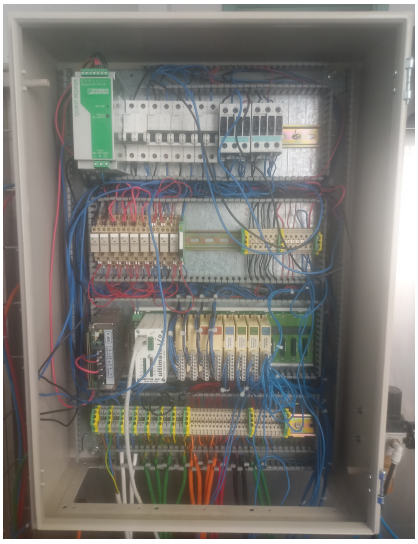
Figura 2.30: cable UTP.

2.3.8. Cuadro eléctrico

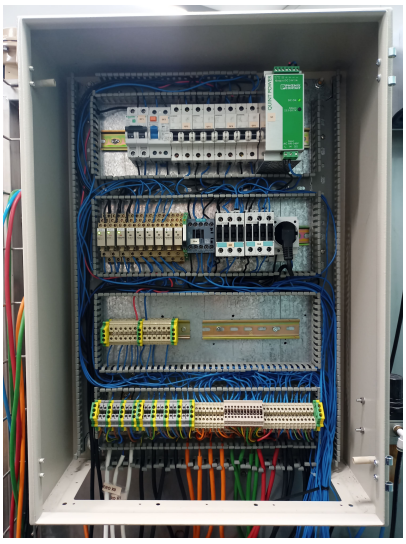
El cuadro eléctrico que se ha utilizado para todo el aparellaje está montado en la cara trasera superior derecha del bastidor de la planta. En la Figura 2.31a se puede observar el cuadro eléctrico sin señalización y con el aparellaje inadecuado según el reglamento electrotécnico de baja tensión. Por otra parte, en la Figura 2.31b se presenta el cuadro eléctrico actualizado como indica el reglamento electrotécnico de baja tensión. En la Tabla 2.11 se presentan las características mecánicas del cuadro eléctrico.

Tabla 2.11: Placa de características del cuadro eléctrico.

Fabricante	ELDON
Modelo	MAS0705021
Protección	IP 66
Dimensiones (Al x A x P)	$70\,\mathrm{cm} \times 50\,\mathrm{cm} \times 18{,}5\,\mathrm{cm}$
Peso	$30\,\mathrm{Kg}$



(a) Cuadro eléctrico en su estado original.



(b) Cuadro eléctrico actualizado.

Figura 2.31: Cuadro eléctrico en su estado original frente al actualizado.

Aparellaje eléctrico

El aparellaje eléctrico que contiene el cuadro eléctrico se describe de la siguiente forma.

Protección

Cuando se habla de aparellaje de protección se hace referencia a los elementos que protegen a los receptores y conductores. La instalación cuenta con dos circuitos: el circuito de potencia y el de maniobra. El circuito de potencia se divide en dos circuitos: el de potencia AC (receptores conectados a la tensión de red) y el de potencia CC (receptores conectados a tensión de $24\,\mathrm{VCC}$, generalmente). De los dos circuitos anteriores se derivan cinco circuitos, por lo que, se utilizan cinco Pequeños Interruptores Automáticos (PIA) como protección contra sobrecargas (sobrecalentamiento) y cortocircuitos (unión de fase y neutro), tal y como se explica a continuación:

- Un PIA general clase C más un interruptor diferencial aguas abajo. Estos dos interruptores protegen toda la instalación y el resto de circuitos. El interruptor diferencial protege al usuario contra contactos directos e indirectos.
- Tres PIA clase D para proteger las dos bombas y el compresor de aire.

- Un PIA clase C para proteger la fuente de alimentación que se utiliza para alimentar el PLC, la instrumentación y las electroválvulas.

Maniobra

El aparellaje de maniobra es el conjunto de elementos que abren y cierran un circuito en carga o en vacío. La instalación cuenta con elementos para maniobras en carga, como son:

- Tres contactores para accionar las dos bombas y el compresor de aire.
- Siete relés, tres de los cuales para accionar los tres contactores anteriores y el resto para accionar las electroválvulas. La utilización de relés está justificada debido al cumplimiento de la normativa vigente respecto a la seguridad eléctrica en mandos de control (ISO 13849-1), la cual exige la implementación de la maniobra de marcha, paro y emergencias mediante relés físicos y nunca a través del PLC.

Conductores

El aparellaje de conductores es el conjunto de elementos que transmiten la energía eléctrica a los receptores. A continuación se explica todo lo relacionado con el cableado de la instalación.

- **Color de cables**

Los colores empleados de los conductores para cablear los distintos circuitos se resumen en la Tabla 2.12.

Tabla 2.12: Colores de cables por circuito.

Color	**Tipo de circuito**
Azul	Neutros de circuitos de potencia AC
Negro	Conductores activos de circuitos de potencia en AC
Azul oscuro	Cableado del PLC y conductores activos en CC
Amarillo/verde	Conductores de protección (tierra)

- **Cableado de actuadores**

Para cablear los actuadores del circuito de potencia AC se utilizaron mangueras de tres hilos con sección de $2{,}5\,\mathrm{mm}^2$. Los actuadores del circuito de potencia

CC se cablearon con mangueras de tres hilos con sección de $1{,}5\,\mathrm{mm}^2$. Las conexiones de los distintos circuitos se hicieron a través de bornes, por su mayor resistencia a los aflojamientos debidos a las vibraciones y a los efectos de variación térmica.

- **Cableado de la instrumentación**

Todas las sondas de la instalación se han cableado con mangueras apantalladas de tres hilos, poniendo la malla protectora en conexión a tierra por uno solo de sus extremos. La sección empleada para las señales analógicas es de $1\,\mathrm{mm}^2$.

- **Cableado de señales analógicas**

Para las señales analógicas se han utilizado cables unipolares con sección de $1\,\mathrm{mm}^2$.

- **Cableado de señales digitales**

Para las señales digitales se han utilizado cables unipolares con sección de $1\,\mathrm{mm}^2$.

Normativa

El dimensionado de los cables se realizó teniendo en cuenta las prescripciones de las instrucciones ITC-BT-19, 20, 21 y 47 del reglamento electrotécnico de baja tensión.

Capítulo 3

Configuración y programación del PLC

En este capítulo se explicará la configuración del PLC y de todos sus módulos. También se detallará la programación empleada para controlar la planta.

3.1. Configuración del hardware

Para iniciar la configuración del hardware se llevarán a cabo las siguientes configuraciones.

3.1.1. Configuración de módulos

Antes de iniciar la configuración del hardware se crea un nuevo proyecto siguiendo la numeración de la Figura 3.1, y se efectúan los pasos siguientes:

1. Crear un proyecto nuevo en TIA Portal.
2. En el árbol del proyecto que aparece en la parte izquierda de la interaz TIA se pulsa en agregar dispositivo.
3. Esto produce la apertura de una pantalla donde se pulsa en controladores.
4. Se elige el dispositivo 1516-3 PN/DP con referencia 6ES7516-3AN01-0AB0, con versión de firmware V2.0 y aceptar.

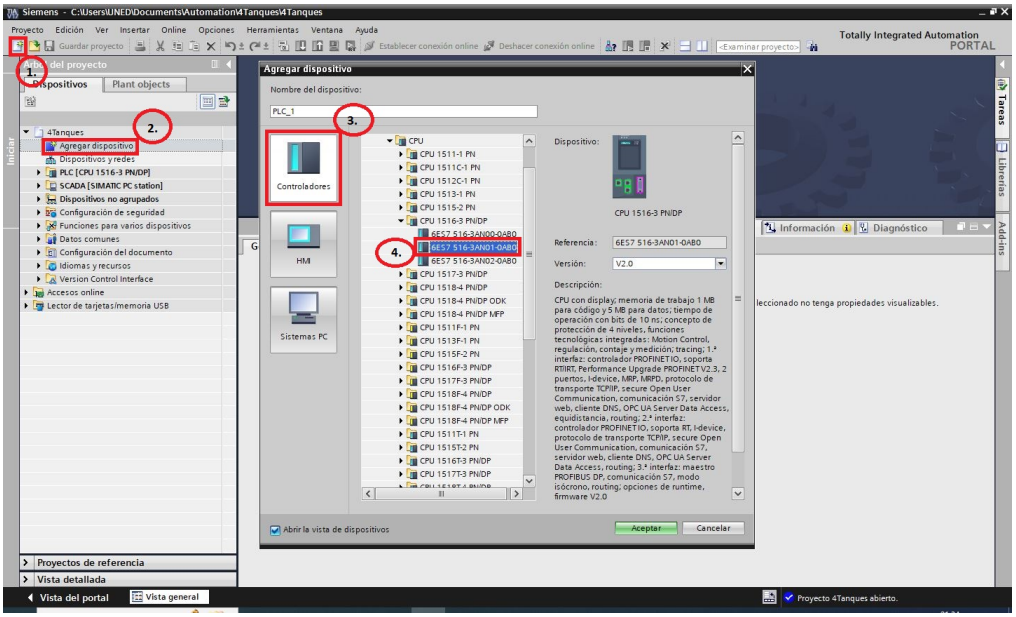


Figura 3.1: Selección de la CPU.

A continuación, se agregan los siguientes módulos complementarios:

- **Módulo de entradas analógicas:** AI 8xU/I/RTD/TC ST con referencia 6ES7 531-7KF00-0AB0 y versión de firmware V2.0.
- **Módulo de salidas analógicas:** AQ 4xU/I ST con referencia 6ES7 532-5HD00-0AB0 y versión de firmware V2.0.
- **Módulo de entradas digitales:** DI 32x24VDC HF con referencia 6ES7 521-1BL00-0AB0 y versión de firmware V2.0.
- **Módulo de salidas digitales:** DQ 32x24VDC/0.5A HF con referencia 6ES7 522-1BL01-0AB0 y versión de firmware V1.0.

siguiendo los pasos numerados, tal y como se muestra en la Figura 3.2.

1. En el árbol del proyecto situado en la parte izquierda se pulsa en configuración de dispositivo.
2. Del catálogo de hardware situado en la parte derecha se agregan los módulos en la posición que ocupan físicamente.

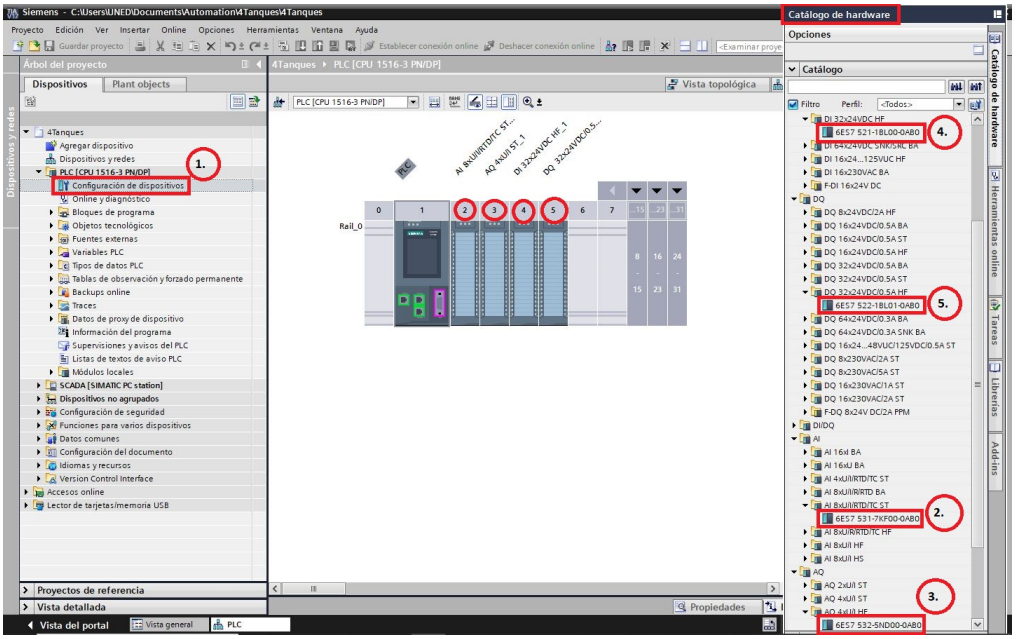


Figura 3.2: Selección de módulos complementarios.

Una vez añadidos todos los módulos en el bastidor se pasa a configurar los módulos de entradas y salidas analógicas.

Mediante el módulo de entradas analógicas, el PLC puede leer la magnitud física que proporciona una sonda. La planta cuenta con cuatro sondas de nivel de dos hilos con rango de medición de $4-20\,\mathrm{mA}$. A continuación, se efectúa la configuración de las entradas correspondientes en el módulo de entradas analógicas, (véase la Figura 3.3).

1. En el árbol del proyecto situado en la parte izquierda se pulsa en configuración de dispositivo.
2. Ir a la pestaña de vista de dispositivos.
3. Se selecciona el módulo de entradas analógicas.
4. Ir a la pestaña de propiedades.
5. Ir a la pestaña de general.
6. Se selecciona entradas y se configuran los canales del 0 al 3 para las sondas de nivel.
7. En ajustes de parámetros se elige manual.

8. En tipo de medición se elige intensidad (transductor a 2 hilos) y en rango de medición 4..20mA.

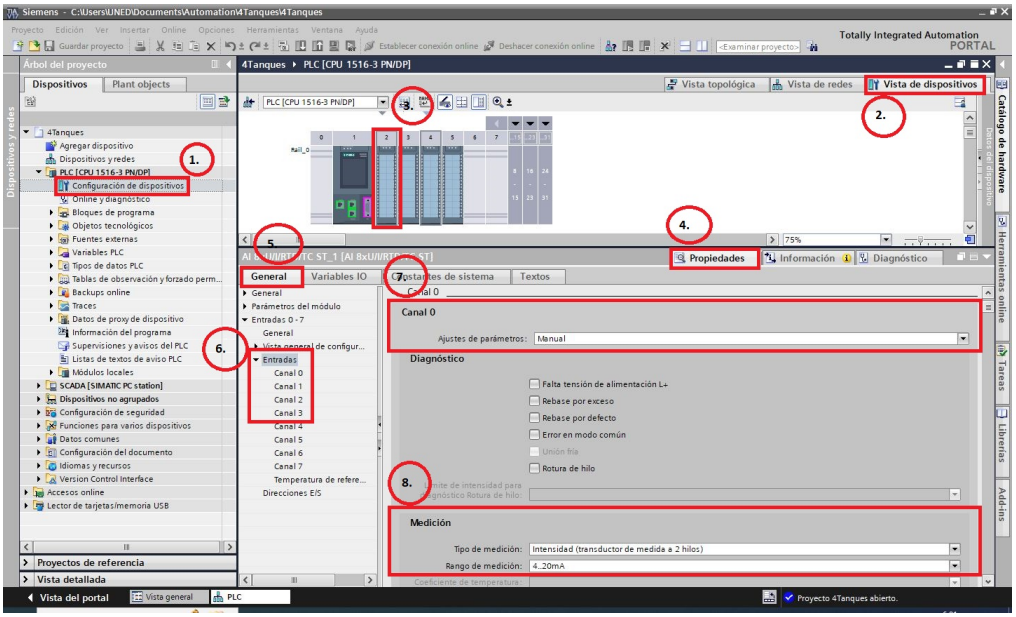


Figura 3.3: Configuración de las sondas de nivel en el módulo de entradas analógicas.

Asimismo, se dispone de cuatro sondas de caudal de tres hilos con rango de medición de $4 - 20\,\mathrm{mA}$. A continuación, se realiza la configuración de las entradas correspondientes en el módulo de entradas analógicas, (véase la Figura 3.4).

1. En el árbol del proyecto situado en la parte izquierda se pulsa en configuración de dispositivo.

2. Ir a la pestaña de vista de dispositivos.

3. Se selecciona el módulo de entradas analógicas.

4. Ir a la pestaña de propiedades.

5. Ir a la pestaña de general.

6. Se selecciona entradas y se configuran los canales del 3 al 7 para las sondas de nivel.

7. En ajustes de parámetros se elige manual.

8. En tipo de medición se elige intensidad (transductor a 4 hilos) y en rango de medición 4..20mA.

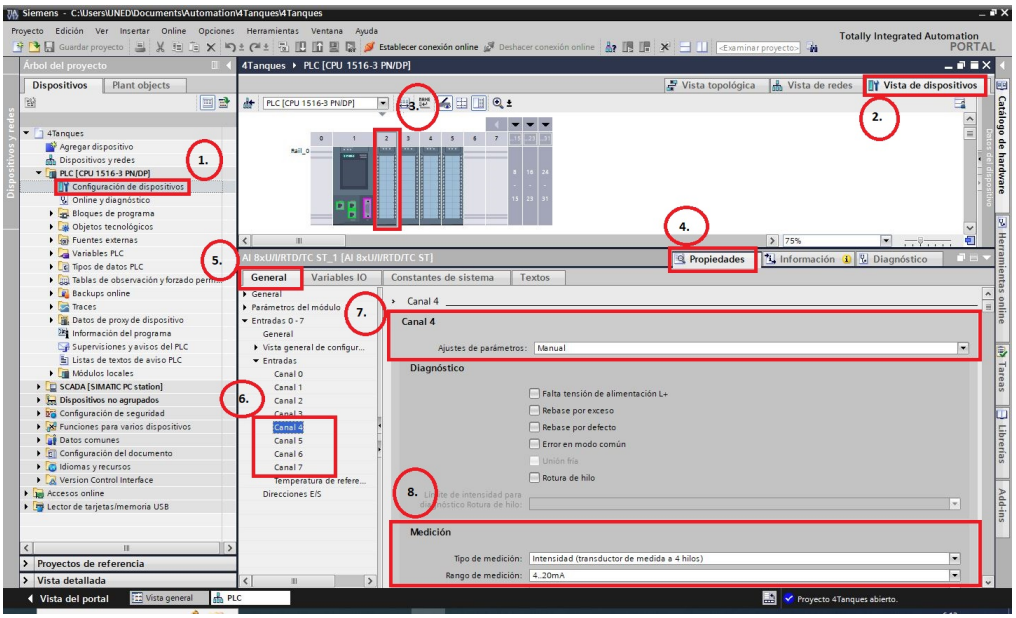


Figura 3.4: Configuración de las sondas de caudal en el módulo de entradas analógicas.

Mediante el módulo de salidas analógicas, el PLC puede suministrar tensión o intensidad a un actuador para ponerlo en funcionamiento en un nivel determinado. La planta cuenta con dos bombas que pueden regularse a través de una salida analógica de $0-10\,\mathrm{VCC}$. A continuación, se lleva a cabo la configuración de las salidas correspondientes en el módulo de salidas analógicas, (véase la Figura 3.5).

1. En el árbol del proyecto situado en la parte izquierda se pulsa en configuración de dispositivo.

2. Ir a la pestaña de vista de dispositivos.

3. Se selecciona el módulo de salidas analógicas.

4. Ir a la pestaña de propiedades.

5. Ir a la pestaña de general.

6. Se selecciona salidas y se configuran los canales del 0 al 1 para las bombas.

7. En ajustes de parámetros se elige manual.

8. En tipo de salida se elige tensión y en rango de salida 0..10V.

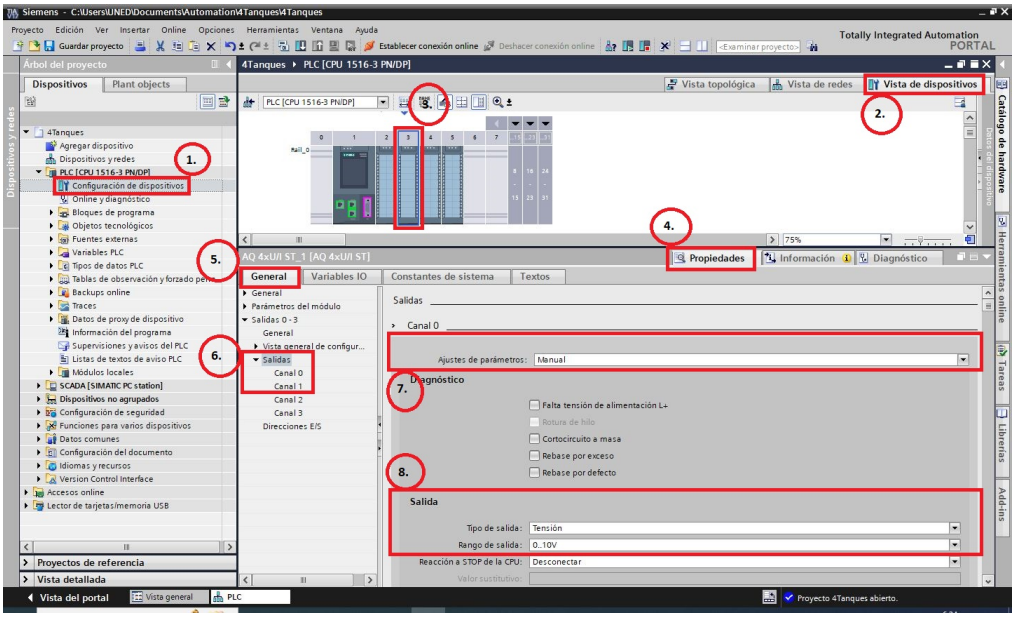


Figura 3.5: Configuración de las salidas correspondientes en el módulo de salidas analógicas.

También, se dispone de dos válvulas de control que pueden regularse a través de una salida analógica de $4-20\,\mathrm{mA}$. A continuación, se procede a realizar la configuración de las salidas correspondientes en el módulo de salidas analógicas, (véase la Figura 3.6).

1. En el árbol del proyecto situado en la parte izquierda se pulsa en configuración de dispositivo.

2. Ir a la pestaña de vista de dispositivos.

3. Se selecciona el módulo de salidas analógicas.

4. Ir a la pestaña de propiedades.

5. Ir a la pestaña de general.

6. Se selecciona salidas y se configuran los canales del 2 al 3 para las válvulas de control.

7. En ajustes de parámetros se elige manual.

8. En tipo de salida se elige intensidad y en rango de salida 4..20mA.

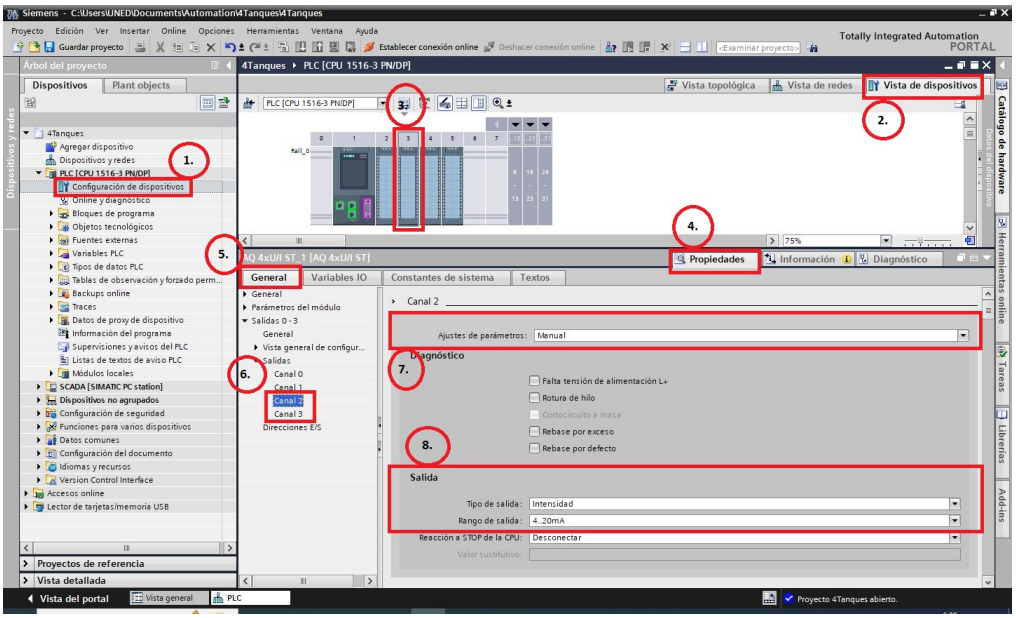


Figura 3.6: Configuración de las salidas correspondientes en el módulo de salidas analógicas.

3.1.2. Dirección IP

Para asignar la dirección IP al PLC se procede a seguir los pasos numerados, como se observa en la Figura 3.7.

1. En el árbol del proyecto situado en la parte izquierda se pulsa en configuración de dispositivo.
2. Ir a la pestaña de vista de dispositivos.
3. Se selecciona el PLC.
4. Ir a la pestaña de propiedades.
5. Ir a la pestaña de general.
6. Se selecciona interfaz PROFINET [X1] y luego direcciones Ethernet.
7. Finalmente, se asigna la dirección IP del PLC y del router.

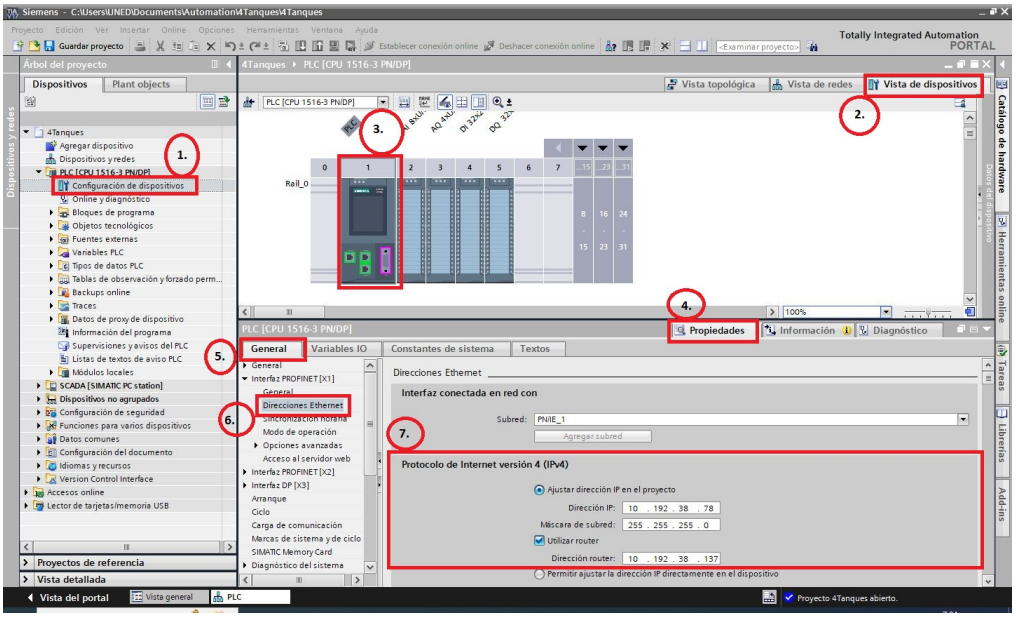


Figura 3.7: Configuración de la dirección IP.

3.1.3. Activación de marcas de sistemas y de ciclo

Las marcas en la programación son áreas fijas de memoria y su tamaño depende del hardware del PLC. Tienden a ser globales y se puede acceder a ellas desde cualquier parte del programa.

Una marca de sistema es una marca con valores definidos. Las marcas de sistema pueden utilizarse en el programa de usuario, por ejemplo, para ejecutar partes del programa sólo en el primer ciclo de ejecución tras el arranque.

Una marca de ciclo es una marca que modifica periódicamente su estado binario. Las marcas de ciclo se utilizan en el programa de usuario, por ejemplo, para controlar indicadores luminosos con una luz intermitente o lanzar procesos periódicos, como la adquisición de un valor real. Para efectuar la activación de marcas de sistemas y de ciclo se siguen los pasos numerados, como se observa en la Figura 3.7.

1. En el árbol del proyecto situado en la parte izquierda se pulsa en configuración de dispositivo.

2. Ir a la pestaña de vista de dispositivos.

3. Se selecciona el PLC.

4. Ir a la pestaña de propiedades.

5. Ir a la pestaña de general.

6. Se selecciona marcas de sistema y de ciclo.

7. Se activa la utilización del byte de marcas de sistema.

8. Se activa la utilización del byte de marcas de ciclo.

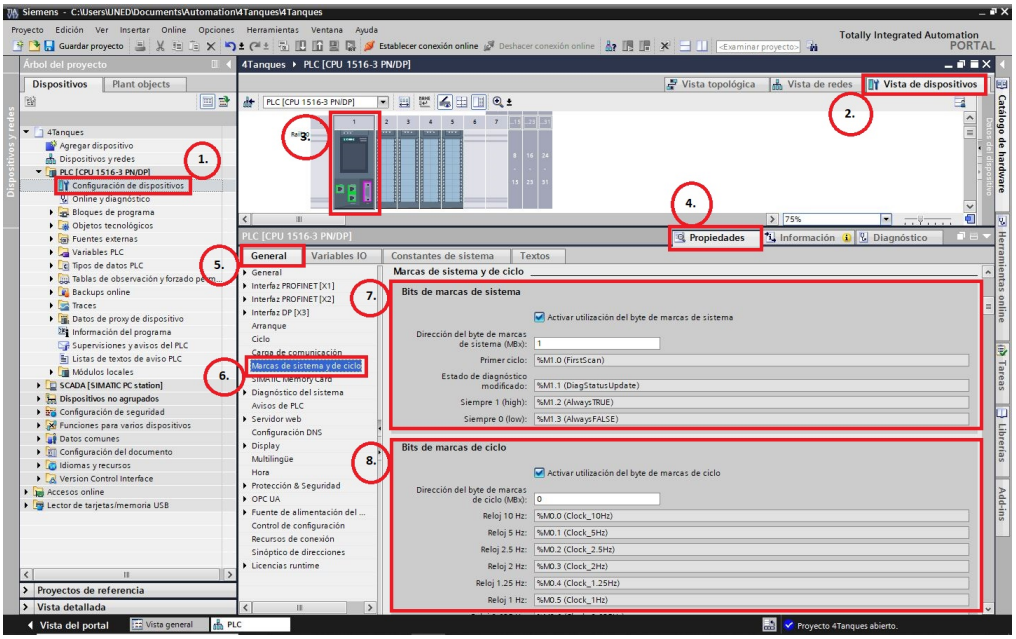


Figura 3.8: Activación de marcas de sistema y de ciclo.

3.1.4. Direccionamiento de variables

Una vez terminada la configuración del hardware hay que definir todos los elementos que se van a utilizar en la automatización, como son: las sondas y las confirmaciones de los actuadores (contactos libres de potencial) que se conectan a las entradas del PLC y los actuadores que se conectan a las salidas del PLC.

Por ello, cuando se crea el proyecto en el PLC se declaran todas las entradas y todas las salidas. Debido a esto, el direccionamiento de entradas y salidas en TIA Portal es el método para asignar una posición de memoria a cada una de las entradas y salidas de modo que, ayudará a tener organizadas las variables del proyecto.

A continuación, se muestran las variables del sistema agrupadas en distintas tablas.

4Tanques ▸ PLC_1 [CPU 1516-3 PN/DP] ▸ Variables PLC ▸ ED [7]

Variables | Constantes de usuario

ED

	Nombre	Tipo de datos	Dirección	Remanen..	Acc...	Escrib...	Visibl...	Supervisión	Comentario
1	Conf_Variador_bI_Nok	Bool	%I16.0	☐	☑	☑	☑		Confirmación de variador bomba izquierda Nok
2	Conf_Variador_bD_Nok	Bool	%I16.1	☐	☑	☑	☑		Confirmación de variador bomba derecha Nok
3	Conf_Variador_bI_Ok	Bool	%I16.2	☐	☑	☑	☑		Confirmación de variador bomba izquierda Ok
4	Conf_Variador_bD_Ok	Bool	%I16.3	☐	☑	☑	☑		Confirmación de variador bomba derecha Ok
5	Conf_KbI_Ok	Bool	%I16.4	☐	☑	☑	☑		Confirmación del contactor bomba izquierda Ok
6	Conf_KbD_Ok	Bool	%I16.5	☐	☑	☑	☑		Confirmación del contactor bomba derecha Ok
7	Conf_Kcr_Ok	Bool	%I16.6	☐	☑	☑	☑		Confirmación del contactor compresor de aire Ok
8	<Agregar>			☐	☑	☑	☑		

Figura 3.9: Tabla de variables de entradas digitales (ED).

En la Figura 3.9 se puede ver cómo se han definido las entradas digitales, poniendo en una tabla todas las entradas (I), acrónimo de Input, seguido del byte 16 y el bit 0, es decir, el bit 0 del byte 16, y así sucesivamente.

4Tanques ▸ PLC_1 [CPU 1516-3 PN/DP] ▸ Variables PLC ▸ SD [7]

Variables | Constantes de usuario

SD

	Nombre	Tipo de datos	Dirección	Rema...	Acces...	Escrib...	Visibl...	Supervisión	Comentario
1	bI	Bool	%Q8.0	☐	☑	☑	☑		Bomba izquierda
2	bD	Bool	%Q8.1	☐	☑	☑	☑		Bomba derecha
3	Compresor	Bool	%Q8.2	☐	☑	☑	☑		Compresor de aire
4	V1	Bool	%Q8.3	☐	☑	☑	☑		Electroválvula tanque 1 (perturbación)
5	V2	Bool	%Q8.4	☐	☑	☑	☑		Electroválvula tanque 2 (perturbación)
6	V3	Bool	%Q8.5	☐	☑	☑	☑		Electroválvula tanque 3 (perturbación)
7	V4	Bool	%Q8.6	☐	☑	☑	☑		Electroválvula tanque 4 (perturbación)
8	<Agregar>			☐	☑	☑	☑		

Figura 3.10: Tabla de variables de salidas digitales (SD).

En la Figura 3.10 se puede ver cómo se han definido las salidas digitales, poniendo en una tabla todas las salidas (Q), acrónimo de Quit, seguido del byte 8 y el bit 0, es decir, el bit 0 del byte 8, y así sucesivamente.

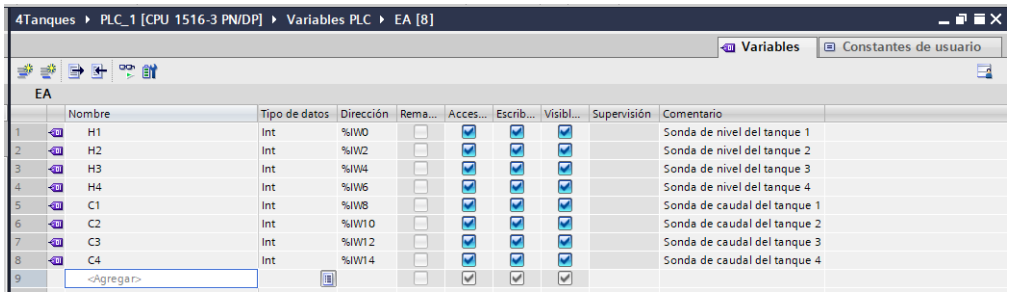


Figura 3.11: Tabla de variables de entradas analógicas (EA).

En la Figura 3.11 se puede observar cómo se han declarado las entradas analógicas, concatenando la I con una palabra (W), acrónimo de Word, seguida el byte 0. Una palabra W es equivalente a dos bytes.

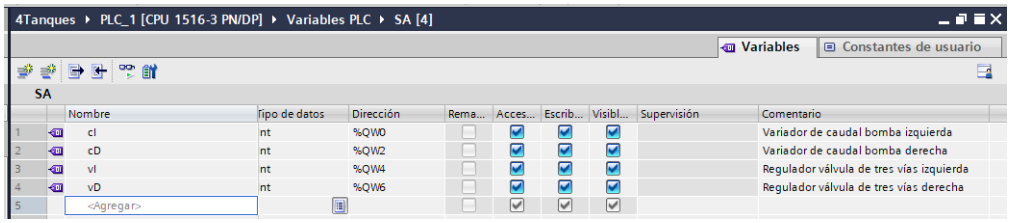


Figura 3.12: Tabla de variables de salidas analógicas (SA).

En la Figura 3.12 se observa que las salidas analógicas son declaradas concatenando la Q con una palabra W, seguida del byte 0, y así sucesivamente.

3.1.5. Integridad del sistema

En este ámbito es crucial la protección de los sistemas de automatización y los componentes de control, como con el SIMATIC S7-1200 y el S7-1500, así como los sistemas SCADA y HMI contra el acceso no autorizado y el cumplimiento de requisitos especiales. Además, la integridad del sistema también implica la autenticación de los usuarios, las autorizaciones de acceso, y el hardening del sistema, es decir, la robustez de los componentes contra los ataques.

Para ello, se procede a proteger todos los bloques del proyecto mediante la protección Know How integrada en TIA Portal, que consiste en restringir el acceso mediante una autorización. Al proteger los bloques se añade una seguridad de acceso al programa contra lectura y escritura y se asegura que cualquier usuario no pueda manipular el código. Cada vez que se intente acceder a un bloque del programa aparecerá una ventana pidiendo contraseña.

3.2. Programación

La finalidad de la programación del PLC es crear programas que cumplan un propósito deseado. Para que el programa pueda ser interpretado y ejecutado, el programa debe estar escrito en un lenguaje de programación.

Para ello, existen diversos lenguajes que se utilizan a la hora de programar y cada uno con ciertas ventajas o características que los hacen idóneos para determinadas tareas concretas.

En el entorno de programación de autómatas TIA Portal V17, el lenguaje de programación viene condicionado por el modelo de PLC con que se cuenta. En la gama S7-1500 se puede programar con los siguientes lenguajes:

- **Funktions Plan (FUP):** También se le denomina diagrama de funciones, pues está ligado de forma estrecha a la lógica booleana, ya que está representado por funciones como OR, AND, NOT, XOR, NAND, NOR, etcétera.
- **Kontakt Plan (KOP):** Se le denomina diagrama de contactos o de escalera, ya que a diferencia del FUP, este lenguaje hace uso de la lógica booleana por medio de contactos eléctricos en serie y paralelo.
- **Structured Control Language (SCL):** Se trata de un lenguaje de programación de SIEMENS de alto nivel basado en Pascal que permite una programación estructurada del PLC.
- **Anweisungs Liste (AWL):** Es un lenguaje de programación tipo ensamblador, lo más cercano al lenguaje máquina en del PLC, formado por un conjunto de nemotécnicos, operandos e instrucciones. Este lenguaje está basado en el lenguaje Statement List (STL) fijado en la norma IEC 61131-3 y es el lenguaje más potente que tiene el PLC.
- **Graphe Fonctionnel de Commande Etape Transition (GRAFCET):** Este lenguaje, que significa diagrama de control con etapas y transiciones, es un híbrido entre KOP y AWL. Su función primaria es crear una cadena de etapas, es decir, pequeños bloques de código que representan funciones específicas del proceso. Asimismo, permite representar también los procesos complejos de una forma muy clara, logrando una programación y una búsqueda efectivas de errores.
- **Cause Effect Matrix (CEM):** Se trata de un nuevo lenguaje de programación basado en una matriz de causas y efectos. Es un lenguaje sencillo de utilizar y muy visual, no siendo necesario tener grandes conocimientos de programación para usarlo. Este lenguaje se ha introducido en la versión 17 de TIA Portal.

Los lenguajes de programación que se han utilizado para programar el PLC son los siguientes: el KOP, el SCL y el AWL. El KOP se ha usado para codificar lógicas sencillas como activar o desactivar una salida y estructurar el programa de forma más legible. El SCL se ha empleado para efectuar tareas complejas como calcular funciones matemáticas, ejecutar bucles y estructuras condicionadas y el AWL se ha utilizado, principalmente, para tener una mejor organización al invocar funciones.

3.2.1. Descripción del programa

Antes de empezar a describir el programa se procede a explicar los modos de funcionamientos del sistema. El sistema dispone de tres modos de funcionamientos, como son:

- **Control manual:** En este modo se activan los actuadores de forma manual a voluntad del usuario.
- **Control descentralizado:** En este modo se pone en marcha un sistema de control compuesto de leyes de control independientes que interconectan un subconjunto de variables de salida (nivel de los tanques inferiores) con otro subconjunto de variables de entrada (caudal de las bombas). En definitiva trata al sistema MIMO de igual número de variables de entrada que de salidas, $n = m$, como m sistemas monovariables SISO [14]. En la Figura 3.13 se muestra el diagrama de bloques de control descentralizado, con m controladores, uno para cada pareja de entrada-salida.

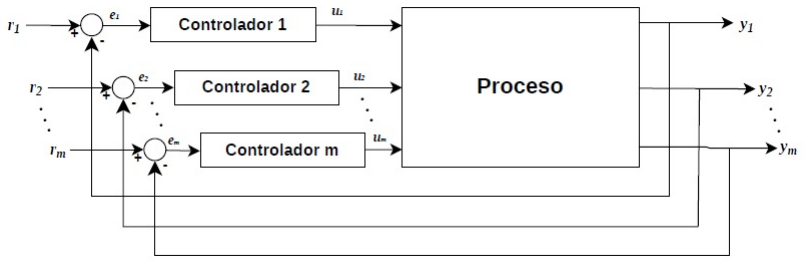


Figura 3.13: Estructura del control descentralizado.

- **Control centralizado:** En este modo se pone en marcha un sistema de control centralizado, colocando entre el controlador y el proceso un bloque compensador $D(s)$ (también conocido como red de desacoplo) de manera que el controlador manipule las variables uc_i en lugar de las variables u_i,

(véase la Figura 3.14). Con esta configuración se pretende que el controlador vea al proceso como un conjunto de m procesos totalmente independientes o con muchas menos interacciones de las que tenían originalmente [14].

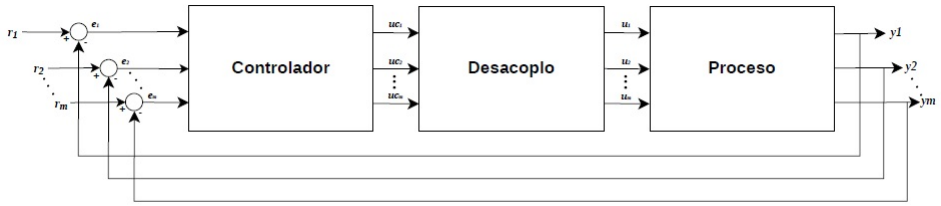


Figura 3.14: Estructura del control centralizado.

El compensador $D(s)$ implementado en este modo es el desacoplo directo simplificado (caso 12) [14], (véase la Figura 3.15).

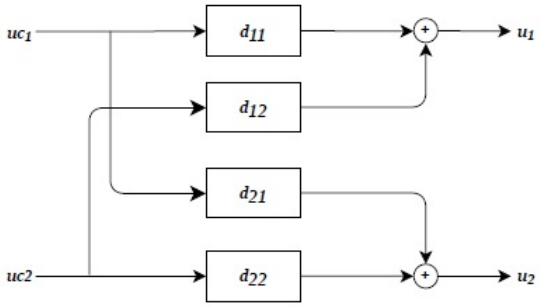


Figura 3.15: Estructura del compensador.

3.2.2. Estructura del programa

Para llevar a cabo el funcionamiento del sistema y conseguir ver claramente cada una de las partes del proyecto por separado, TIA Portal V17 provee distintos tipos de bloques.

Los bloques en TIA Portal son partes del programa donde se puede introducir un código de programa determinado y, de esta manera, dividir un programa extenso en diferentes bloques para tener una mejor comprensión de éste.

Por consiguiente, podemos diferenciar varios tipos de bloques en TIA Portal para realizar un programa de usuario que controle toda la automatización del proceso, de manera bien estructurada:

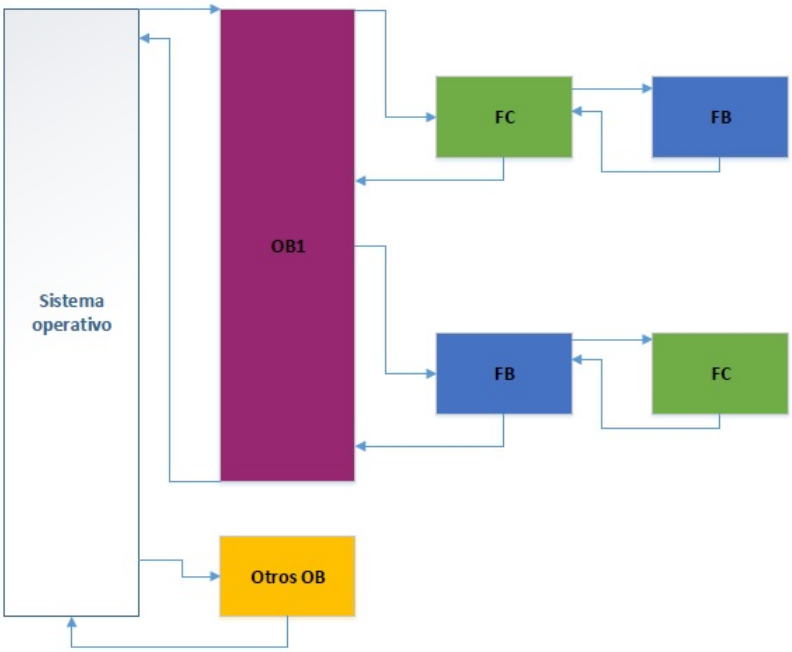


Figura 3.16: Estructura de llamadas del PLC.

- **Organization Block (OB):** También denominado bloque de organización, es invocado por el sistema operativo de forma cíclica y constituye la interfaz entre el programa de usuario y el sistema operativo. El sistema operativo llama este OB de ciclo una vez por ciclo, iniciando con ello la ejecución del programa de usuario. Es posible utilizar varios OB de ciclo. Si se utilizan varios OB de ciclo, estos se llaman uno tras otro en el orden correspondiente a su número de OB. El OB de ciclo con el menor número de OB se llama primero, (véase la Figura 3.16).

  El OB principal, llamado Main (OB1), ejecuta sus instrucciones en el orden en el que se han guardado en la memoria de programa. Al llegar al fin del programa (fin de bloque), vuelve a comenzar la ejecución del programa desde el principio, (véase la Figura 3.17). Esto se denomina ejecución cíclica o ciclo de scan. Un ciclo de ejecución del programa abarca los siguientes pasos:

  1. El sistema operativo inicia la medición del tiempo de ciclo.

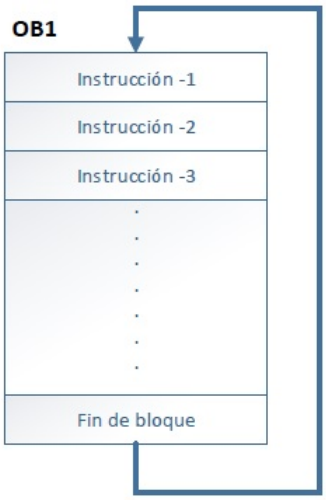


Figura 3.17: Ejecución cíclica del OB1.

2. La CPU lee el estado de las entradas en el módulo de entrada y escribe los datos de entrada en la memoria imagen de proceso de las entradas.
3. La CPU procesa el programa de usuario y ejecuta las operaciones indicadas en el programa.
4. La CPU escribe los estados de la memoria imagen de proceso de las salidas en los módulos de salida.
5. El sistema operativo evalúa el tiempo de ciclo calculado y vuelve a iniciar la medición.

Si en el programa de usuario se activan las áreas de operandos de entradas I y salidas Q, no se consultan o modifican los estados de señal directamente en los módulos de señales digitales, sino en un área de la memoria de sistema de la CPU. Dicha área de memoria se denomina memoria imagen de proceso.

La CPU vigila el tiempo de ciclo. De forma estándar, el tiempo de ciclo máximo está predeterminado en $150\,\mathrm{ms}$. Este valor se puede cambiar mediante parametrización de la CPU. Si el tiempo de ciclo es mayor que el tiempo de ciclo máximo, se llama al OB de error de tiempo (OB80).

Si la CPU finaliza el ciclo normal antes del tiempo de ciclo mínimo especificado, aprovechará el tiempo restante para realizar tareas de diagnóstico en RUNTIME y/o procesar peticiones de comunicación.

- **Function Block (FB):** Llamados también bloques de función; son bloques lógicos que depositan sus valores de forma permanente en bloques de datos de instancia, de modo que siguen estando disponibles después de procesar el bloque. Por lo tanto, se puede invocar varias veces a un FB en distintas partes del programa con un bloque de datos DB asociado, cambiando los valores que hay en su interior.

- **Function (FC):** Denominados también función; son bloques lógicos sin memoria que se utilizan para programar una operación específica dentro del código de programa general.

- **Data Block (DB):** Conocido como bloques de datos; son zonas de memoria donde se almacenan datos que se van generando a lo largo del programa o incluso que contienen datos para utilizar en distintas zonas del programa.

En la Figura 3.18 se presenta el árbol del proyecto y en el recuadro rojo los bloques de programa agrupados por carpetas.

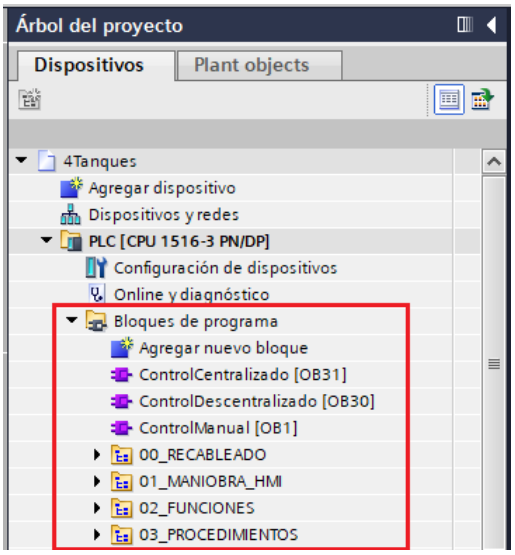


Figura 3.18: Árbol del proyecto.

A continuación se describen cada grupo con sus bloques de programa.

- **00_RECABLEADO:** Este grupo está compuesto por un DB que contienen variables globales internas que son una copia de las entradas y salidas físicas del PLC. Estás variables declaradas en los DB sirven de espejo o de

intermedio de las entradas y salidas físicas y facilitan el trabajo de la programación del proyecto. Los DB que contiene este grupo se presentan en la Figura 3.19 y se describen de la siguiente forma:

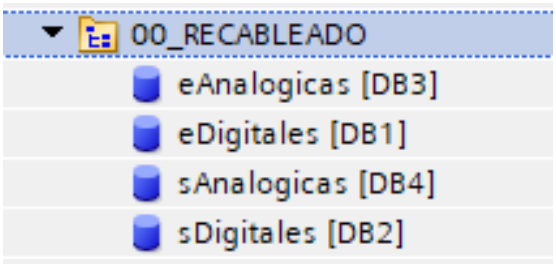


Figura 3.19: 00_RECABLEADO.

- **eDigitales [DB1]:** Este DB contiene las variables que sirven de espejo de las entradas digitales físicas del PLC.
- **sDigitales [DB2]:** Este DB contiene las variables que sirven de espejo de las salidas digitales físicas del PLC.
- **eAnalogicas [DB3]:** Este DB contiene las variables que sirven de espejo de las entradas analógicas físicas del PLC.
- **sAnalogicas [DB4]:** Este DB contiene las variables que sirven de espejo de las salidas analógicas físicas del PLC.

- **01_MANIOBRA_HMI:** Este grupo está compuesto por DB que contienen variables globales internas usadas para maniobrar la planta desde el sistema SCADA, es decir, a través de estas variables podemos interactuar con la planta desde la interfaz. Los DB que contiene este grupo se presentan en la Figura 3.20 y se describen de la siguiente manera:

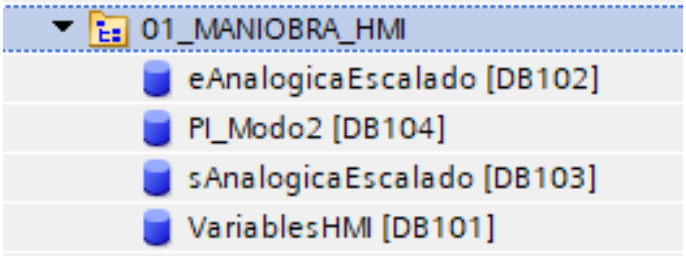


Figura 3.20: 00_MANIOBRA_HMI.

- **VariablesHMI [DB101]:** Este DB contiene las variables para la puesta en marcha y parada de los actuadores.
- **eAnalogicaEscalado [DB102]:** Este DB contiene las variables que sirven para parametrizar el normalizado y escalado de las entradas analógicas.
- **sAnalogicaEscalado [DB103]:** Este DB contiene las variables que sirven para parametrizar el escalado y normalizado de las salidas analógicas.
- **PI_Modo2 [DB104]:** Este DB contiene las variables que sirven para parametrizar el controlador PI.

- **02_FUNCIONES:** Este grupo contiene todas las funciones empleadas para el funcionamiento y estructuración del proyecto y está dividido por dos subgrupos, el de FBs y FCs, como se presenta en la Figura 3.21 y se detallan a continuación:

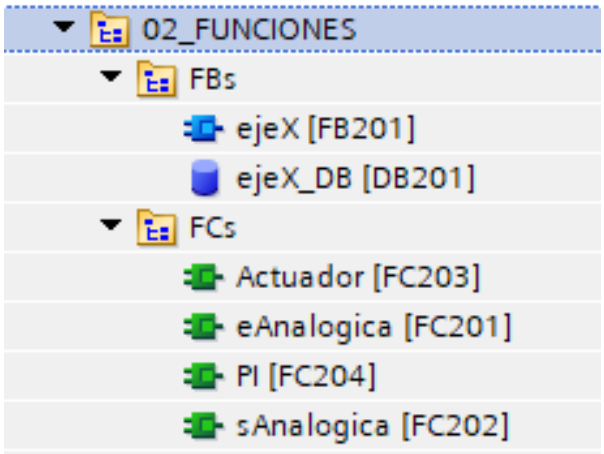


Figura 3.21: 02_FUNCIONES.

- **FBs:** Este subgrupo contiene la siguiente FB:
  - **ejeX [FB201]:** Esta FB es una función parametrizada, programada en lenguaje KOP y se emplea para generar la variable tiempo, usada generalmente para graficar el eje x de los diagramas que contiene el sistema SCADA. Esta FB genera un DB de instancia ejeX_DB para almacenar las variables static usadas en la FB.
- **FCs:** Este subgrupo contiene las siguientes FC:

- **eAnalogica [FC201]:** Esta FC es una función parametrizada, programada en lenguaje SCL y es usada para normalizar y escalar las entradas analógicas. La función recibe un valor entre 0 y 27648, lo normaliza entre esos dos valores en una escala lineal devolviendo un valor real entre $0{,}0$ y $1{,}0$. Esa salida real normalizada se escala entre un rango de valores máximo y mínimo de las variables nivel y caudal.
- **sAnalogica [FC202]:** Esta FC es una función parametrizada, programada en lenguaje SCL y hace el proceso inverso que la función anterior. Esta función primero escala entre un rango de valores máximo y mínimo de las consignas de los actuadores y posteriormente normaliza entre los valores digitales 0 y 27648 para ser introducido al módulo de salidas analógicas del PLC. Finalmente, el módulo de salidas analógicas retorna un valor entre 0-10VCC o entre 4-20mA.
- **Actuador [FC203]:** Es una función parametrizada y programada en lenguaje KOP usada, principalmente, para poner en marcha o paro todos los actuadores de potencia, como las bombas o el motor del compresor de aire. También, es ustilizada para poner en marcha o paro otros bloques de función que necesitan ser habilitados para su funcionamiento, como el bloque de función ejeX y la función PI.
- **PI [FC204]:** Esta FC es una función parametrizada y programada en lenguaje SCL. Esta función contiene el código para calcular las acciones proporcional (P) e integral (I) que combinándolas resultan en un controlador PI [12], utilizado para regular los niveles de los tanques inferiores de la planta. Del mismo modo, la función dispone de la opción de utilizar anti-windup mediante el método clamping, que es un mecanismo de control que busca evitar que la acción integral continúe integrando cuando la acción de control se encuentra saturada.

  Para implementar esta FC en TIA Portal se parte de la ley de control en tiempo continuo y luego se procede a discretizar, tal y como se detalla a continuación.

Acción proporcional

El término proporcional viene dado por

$$C_p(t) = K_p \cdot (S_p(t) - P_v(t)) \tag{3.1}$$

donde K_p es la ganancia proporcional, S_p la consigna y P_v la variable del proceso. Este término se implementa simplemente reemplazando las variables continuas por sus versiones muestreadas. Por lo tanto,

$$C_p(t_k) = K_p \cdot (S_p(t_k) - P_v(t_k)) \tag{3.2}$$

donde tk denota los instantes de muestreo, es decir, las veces que la CPU lee la entrada analógica.

Acción integral

El término integral viene dado por

$$I(t) = \frac{K_p}{T_i} \cdot \int_0^t e(s) \cdot ds \tag{3.3}$$

Se deduce que

$$\frac{dI}{dt} = \frac{K_p}{T_i} \cdot e(t) \tag{3.4}$$

Aproximando la derivada por una diferencia hacia delante resulta en

$$\frac{I(t_{k+1}) - I(t_k)}{h} = \frac{K_p}{T_i} \cdot e(t_k) \tag{3.5}$$

Esto lleva a la siguiente ecuación recursiva del término integral

$$I(t_{k+1}) = I(t_k) + \frac{K_p}{T_i} \cdot e(t_k) \cdot h \tag{3.6}$$

La FC que contiene el código con la acción proporcional y la acción integral se ejecuta siguiendo la secuencia:

1. Esperar a la interrupción cíclica.
2. Leer la entrada analógica.
3. Calcular la acción de control.

4. Escribir la salida analógica.
5. Actualizar las variables del controlador.
6. Ir al paso 1.

y se invoca en el OB30 y OB31 porque son bloques de interrupción cíclica con un tiempo de muestreo de 100 ms.

- **03_PROCEDIMIENTOS:** Este grupo contiene todos los procedimientos empleados en el proyecto y que son usados principalmente para agrupar código y funciones, como se presenta en la Figura 3.22 y se explica a continuación:



Figura 3.22: 03_PROCEDIMIENTOS.

- **enDigitales [FC301]:** En este procedimiento se lee el estado de las entradas digitales físicas y se asignan a las variables intermedias declaradas en el DB eDigitales.
- **enAnalogicas [FC302]:** En este procedimiento se lee el valor de las entradas analógicas físicas y se asignan a las variables intermedias declaradas en el DB eAnalogicas.
- **saDigitales [FC303]:** En este procedimiento se lee el estado de las variables intermedias declaradas en el DB sDigitales y se asignan a las salidas digitales físicas.

- **saAnalogicas [FC304]:** En este procedimiento se lee el valor de las variables intermedias del DB sAnalogicas y se asignan a las variables analógicas físicas.
- **Entradas [FC305]:** Este procedimiento es usado para agrupar los procedimientos enDigitales y enAnalogicas.
- **Procesos [FC306]:** Este procedimiento es utilizado para agrupar los siguientes procedimientos: Escalado_enAnalogicas, Escalado_saAnalogicas, ejesXs, marchaParo y CerrarRT.
- **Salidas [FC307]:** En este procedimiento se agrupan los procedimientos sDigitales y sAnalogicas.
- **Escalado_enAnalogicas [FC308]:** Este procedimiento agrupa las funciones que se encargan del normalizado y escalado de las entradas analógicas.
- **Escalado_saAnalogicas [FC309]:** Este procedimiento agrupa las funciones que se encargan del escalado y normalizado de las salidas analógicas.
- **marchaParo [FC310]:** En este procedimiento se agrupan las funciones de marcha y paro de los actuadores.
- **ejesXs [FC311]:** Este procedimiento agrupa los bloques de función dedicados a la generación del eje x.
- **CerrarRT [FC312]:** Este procedimiento se encarga de poner el sistema en condiciones iniciales tras cerrar el sistema SCADA.

- **ControlDescentralizado [OB30]:** Este OB de interrupción cíclica se ejecuta cada $100\,\mathrm{ms}$ y tiene menor prioridad que el OB1, es decir, se ejecuta cuando el OB1 termine. El bloque es usado para invocar las funciones PI cada $100\,\mathrm{ms}$ encargadas del control descentralizado.
- **ControlCentralizado [OB31]:** Este OB de interrupción cíclica se ejecuta cada $100\,\mathrm{ms}$ y se encarga de invocar las funciones PI y las funciones de transferencias usadas para el control centralizado.
- **ControlManual [OB1]:** Teniendo el proyecto bien estructurado y organizado con funciones, en este OB se invocan los procedimientos Entradas, Procesos y Salidas.

Capítulo 4

Sistema SCADA

En este capítulo se explicarán los conceptos de HMI y SCADA. También se explicará el manejo de la interfaz y todas sus funcionalidades que tendrá.

4.1. SCADA

El SCADA es un concepto que se emplea para desarrollar software para ordenadores que permite controlar y supervisar procesos industriales de forma remota. Facilita la retroalimentación en tiempo real con los dispositivos de campo (sensores y actuadores) y controla el proceso automáticamente. Provee de toda la información que se genera en el proceso (supervisión, control de calidad, control de producción, almacenamiento de datos, etc.) y permite su gestión e intervención [13].

El sistema SCADA también puede mostrar gráficos históricos, tendencias, tablas con alarmas y eventos entre otras funciones. Puede y debe estar sujeto a permisos y accesos de los usuarios y desarrolladores de acuerdo a su nivel jerárquico en la organización y la función que cumple dentro de ésta.

4.1.1. HMI

Es la interfaz que permite presentar los datos a un operador y a través de la cual éste controla el proceso.

Los sistemas HMI son como una “ventana al proceso”. Esta ventana puede estar en dispositivos como paneles de operador o el monitor de ordenador. Los sistemas HMI implementados en ordenadores se les conoce también como sistema PC de monitorización y control de supervisión.

4.1.2. Componentes del sistema

Los tres componentes de un sistema SCADA son:

1. Unidad de Terminal Remota (UTR).
2. Estación maestra y ordenador con sistema PC.
3. Infraestructura de comunicación.

UTR

Es un dispositivo basado en microprocesadores que permite obtener señales independientes de los procesos y enviar la información a un sitio remoto donde se procesa. Generalmente, ese sitio remoto es una sala de control en la que se encuentra el sistema SCADA, el cual permite visualizar las variables enviadas por la UTR. Dentro del universo de las UTR están los PLC quienes han expandido sus facilidades de comunicación para la gestión de gran número de señales con precisión de milisegundos.

Estación maestra

El término "estación maestra" hace referencia a los servidores y al software responsable de comunicarse con el equipo del campo (RTU, PLC, etc.) En un sistema SCADA pequeño, la estación maestra puede estar en un solo ordenador.

El TIA Portal incluye el Windows Control Center (WINCC) como estación maestra. WINCC es el software de ingeniería para configurar SIMATIC Panels, PC industriales SIMATIC y sistemas PC con el software de visualización WinCC Runtime Advanced o el WinCC Runtime Professional, escrito para el sistema operativo Microsoft Windows y utiliza Microsoft SQL Server para iniciar sesión.

La edición de WINCC que se ha utilizado para desarrollar el sistema SCADA de este proyecto es la WinCC Runtime Advanced. WinCC RT Advanced es un software para la configuración y visualización de sistemas monopuesto basados en sistemas PC. WinCC RT Advanced está disponible con licencias para 128, 512, 2k, 4k, 8k y 16k PowerTags (variables con conexión al proceso).

Infraestructura de comunicación

Se ha utilizado el Process Field Network (PROFINET) como red de comunicación. PROFINET es un protocolo de comunicación Ethernet para la automatización de procesos industriales basado en estándares abiertos TCP/IP e IT y desarrollado con un enfoque semejante al bus de campo PROFIBUS DP. Asimismo,

es un mecanismo para intercambiar datos entre el PLC y el sistema SCADA. Para llevar a cabo este proceso se debe agregar el sistema PC en el TIA Portal, como se presenta en la Figura 4.1 y luego configurar la red.

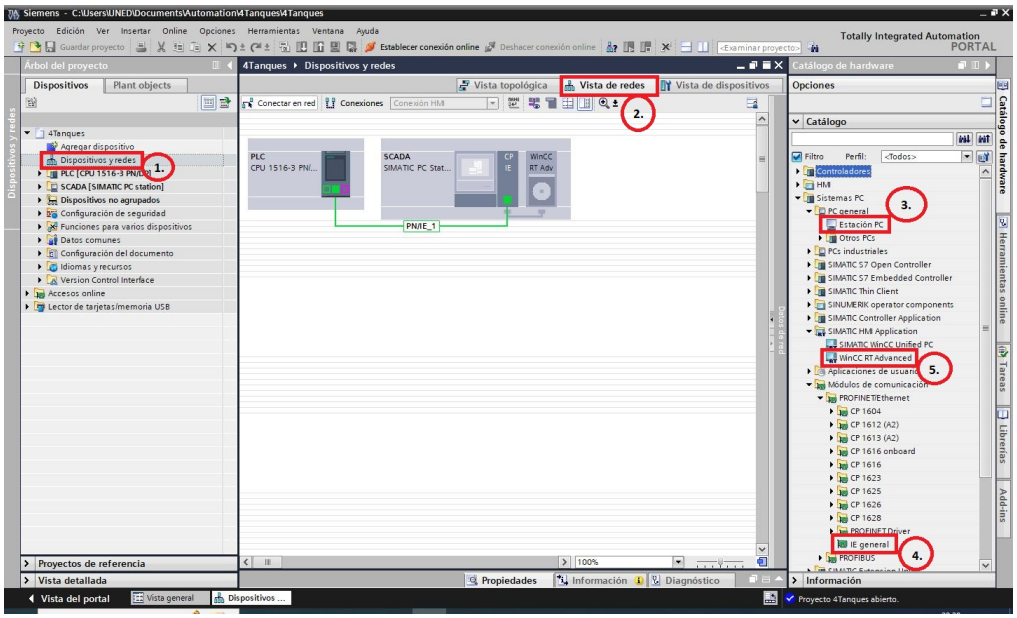


Figura 4.1: Selección del sistema PC.

1. En el árbol del proyecto situado en la parte izquierda se pulsa en dispositivos y redes.

2. Ir a la pestaña de vista de redes.

3. En el catátolo de hardware situado en la parte derecha se elige la estación PC.

4. En la carpeta de módulos de comunicación se selecciona la subcarpeta PROFINET/Ethernet y se elige la tarjeta de comunicación IE general.

5. Finalmente, en SIMATIC HMI Application se elige WinCC RT Advanced.

La comunicación entre el PLC y el sistema PC será por PROFINET como se ha indicado, asegurando que todos los dispositivos estén en la misma red, es decir, que la IP de un equipo sea visible por el otro. La dirección IP del sistema PC será la misma que la del ordenador ya que será utilizado como HMI, (véase la Figura 4.2).

1. En el árbol del proyecto situado en la parte izquierda se pulsa en configuración de dispositivos.
2. Ir a la pestaña de vista de dispositivos.
3. En el menú desplegable se elige el dispositivo en cuestión.
4. Se selecciona el puerto RJ45 del dispositivo.
5. Ir a la pestaña de propiedades.
6. Ir a la pestaña de general.
7. Por último, se elige direcciones Ethernet y se asigna la IP.

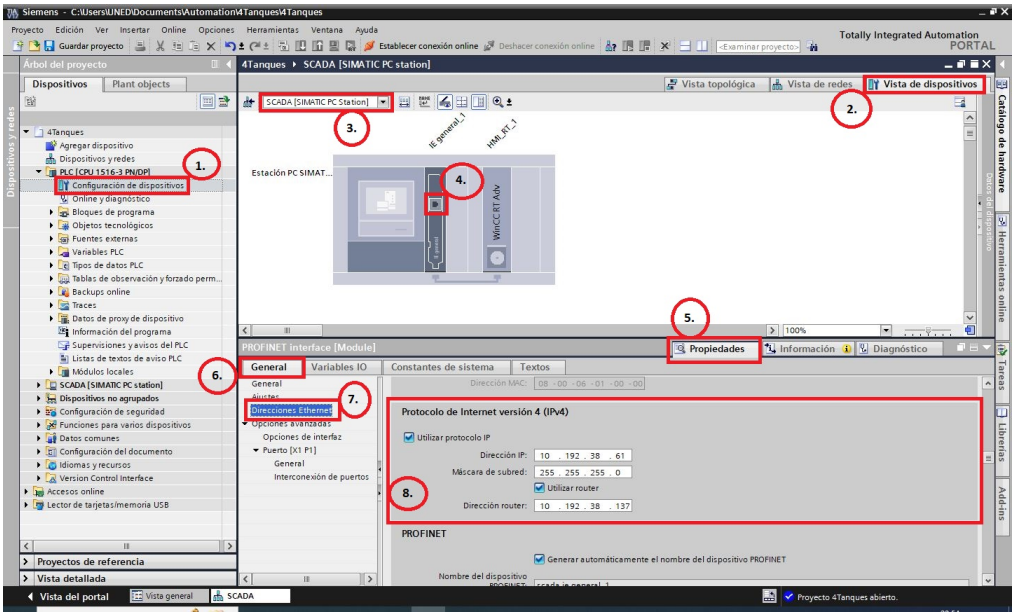


Figura 4.2: Configuración de la dirección IP del sistema PC.

La red de comunicación PROFINET queda configurada, (véase la Figura 4.3).

1. Ir a la pestaña de vista de redes.
2. Finalmente, pulsar el botón conectar en red.

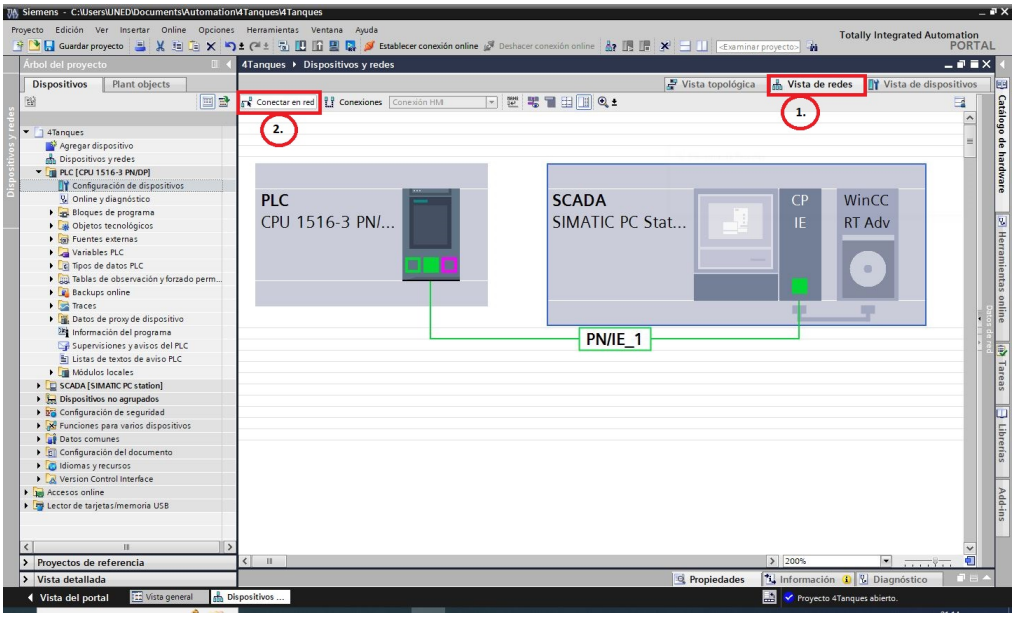


Figura 4.3: Red de comunicación industrial PROFINET.

4.2. Descripción del sistema SCADA

En esta sección se describe la interfaz gráfica desarrollada en WinCC RT Advanced para la realización de experiencias prácticas remotas con la planta.

4.2.1. Pantalla de control manual

En esta pantalla el usuario puede controlar la planta en lazo abierto.

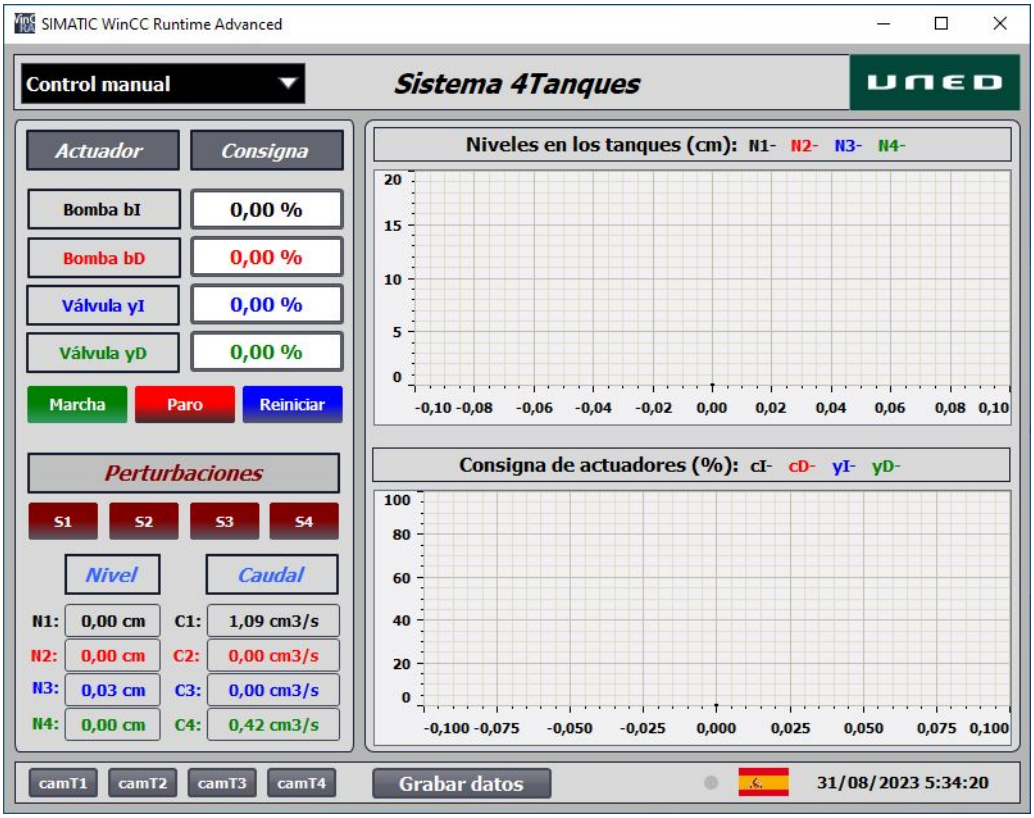


Figura 4.4: Pantalla de control manual.

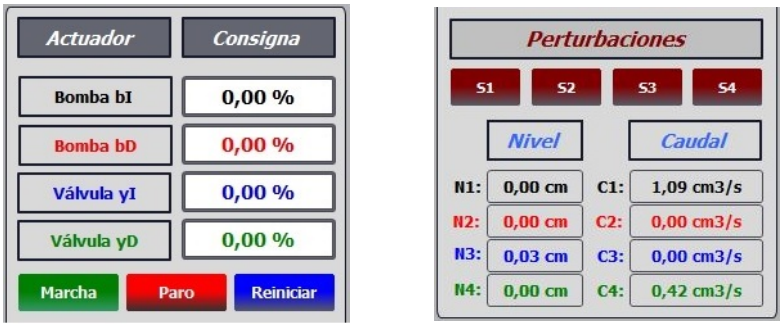
Está compuesta por cuatro partes, (véase la Figura 4.4). La parte superior se denomina encabezado. En la parte izquierda, que se denomina sección de maniobra, se puede observar una serie de campos de entradas/salidas de consignas y botones. En la parte derecha, que se denomina sección de evolución, se muestra la evolución temporal de las variables principales del proceso. En la parte inferior, que se denomina pie, se puede observar una serie de botones y un campo de fecha y hora. Cabe mencionar que, todas las pantallas contienen estas cuatro partes y que solo se diferencian en el contenido que tiene la sección de maniobra y evolución.

Encabezado



Figura 4.5: Encabezado.

El encabezado contiene un menú desplegable a la izquierda para navegar a través de la interfaz, el nombre del proyecto en el centro y el nombre de la universidad a la derecha, (véase la Figura 4.5).



(a) Introducción de consignas.

(b) Perturbaciones y visualización.

Figura 4.6: Sección de maniobra.

Sección de maniobra

La sección de maniobra (véase la Figura 4.6) cuenta con un panel para introducir las consignas de los actuadores, (véase la Figura 4.6a) de la manera siguiente:

- **Bomba bI:** Este campo de entrada sirve para fijar el caudal de la bomba izquierda que va de 0 % a 100 %, donde el 0 % es el caudal mínimo y 100 % es el caudal máximo.
- **Bomba bD:** Este campo de entrada sirve para fijar el caudal de la bomba derecha que va de 0 % a 100 %, donde el 0 % es el caudal mínimo y 100 % es el caudal máximo.
- **Válvula yI:** Este campo de entrada sirve para indicar a la válvula de control izquierda la distribución del líquido entre los tanques T1 y T4. La consigna va de 0 % a 100 %, donde el 0 % envía todo el líquido al tanque T1 y el 100 % envía todo el líquido al tanque T4.

- **Válvula yD:** Este campo de entrada sirve para indicar a la válvula de control derecha la distribución del líquido entre los tanques T2 y T3. La consigna va de $0\,\%$ a $100\,\%$, donde el $0\,\%$ envía todo el líquido al tanque T2 y el $100\,\%$ envía todo el líquido al tanque T3.

Y los botones de Marcha, Paro y Reiniciar sirven para realizar las siguientes acciones:

- **Marcha:** Este botón sirve para la puesta en marcha de los actuadores mediante un pulso.
- **Paro:** Este botón sirve para la puesta en paro de los actuadores mediante un pulso.
- **Reiniciar:** Este botón sirve para la puesta en condiciones iniciales de la planta, es decir, reinicia los valores de las consignas, reinicia las gráficas y desactiva los actuadores mediante un pulso.

Asimismo, la sección de maniobra también incluye una parte que contiene botones para perturbar los niveles y de campos de salida para visualizar los niveles y caudales de los tanques (véase la Figura 4.6b), pudiéndose utilizarse de la siguiente forma:

- **S1:** Este botón sirve para activar la electroválvula Y1 que perturba el tanque T1 mientras se mantiene pulsado.
- **S2:** Este botón sirve para activar la electroválvula Y2 que perturba el tanque T2 mientras se mantiene pulsado.
- **S3:** Este botón sirve para activar la electroválvula Y3 que perturba el tanque T3 mientras se mantiene pulsado.
- **S4:** Este botón sirve para activar la electroválvula Y4 que perturba el tanque T4 mientras se mantiene pulsado.

Sección de evolución

En la sección de evolución se sitúan dos gráficas en las que se recogen las variables más importantes del proceso, (véase la Figura 4.7).

En la gráfica superior se representan las medidas de los niveles de los tanques N1, en negro; N2, en rojo; N3, en azul; y N4, en verde.

En la gráfica inferior se representa la evolución de las consignas de los actuadores, es decir, los caudales de las bombas cI, en negro; y cD, en rojo, y las posiciones de las válvulas de control yI, en azul; y yD, en verde.

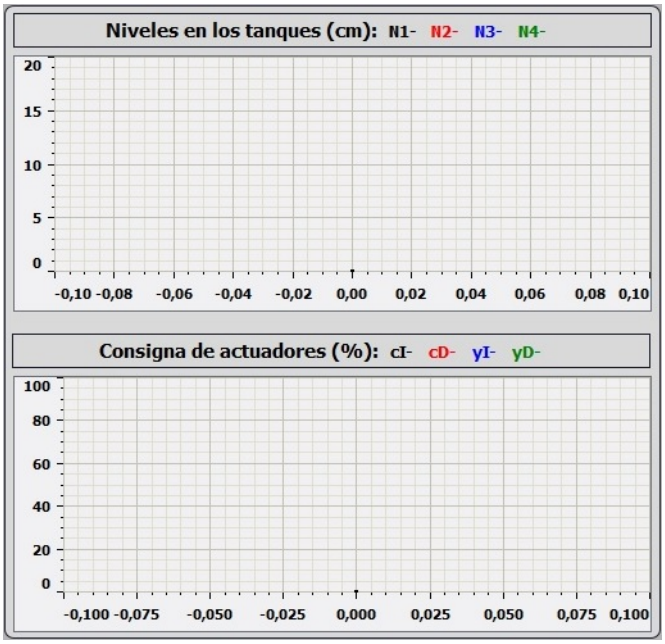


Figura 4.7: Sección de evolución.

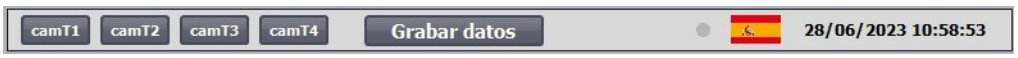


Figura 4.8: Pie.

Pie

El pie cuenta con seis botones y un campo de fecha y hora, (véase la Figura 4.8), pudiéndose utilizar de la siguiente forma:

- **camT1:** Este botón activa una imagen emergente que muestra el tanque T1 en vivo.
- **camT2:** Este botón activa una imagen emergente que muestra el tanque T2 en vivo.
- **camT3:** Este botón activa una imagen emergente que muestra el tanque T3 en vivo.

- **camT4:** Este botón activa una imagen emergente que muestra el tanque T4 en vivo.
- **Grabar datos/Parar grabación:** Este botón permite almacenar los datos de las variables más importantes del proceso en un fichero de texto (.txt). El nombre por defecto del fichero será "RegistroModo1".
- **Idioma:** Este botón con forma de bandera permite cambiar del idioma español al inglés y viceversa.

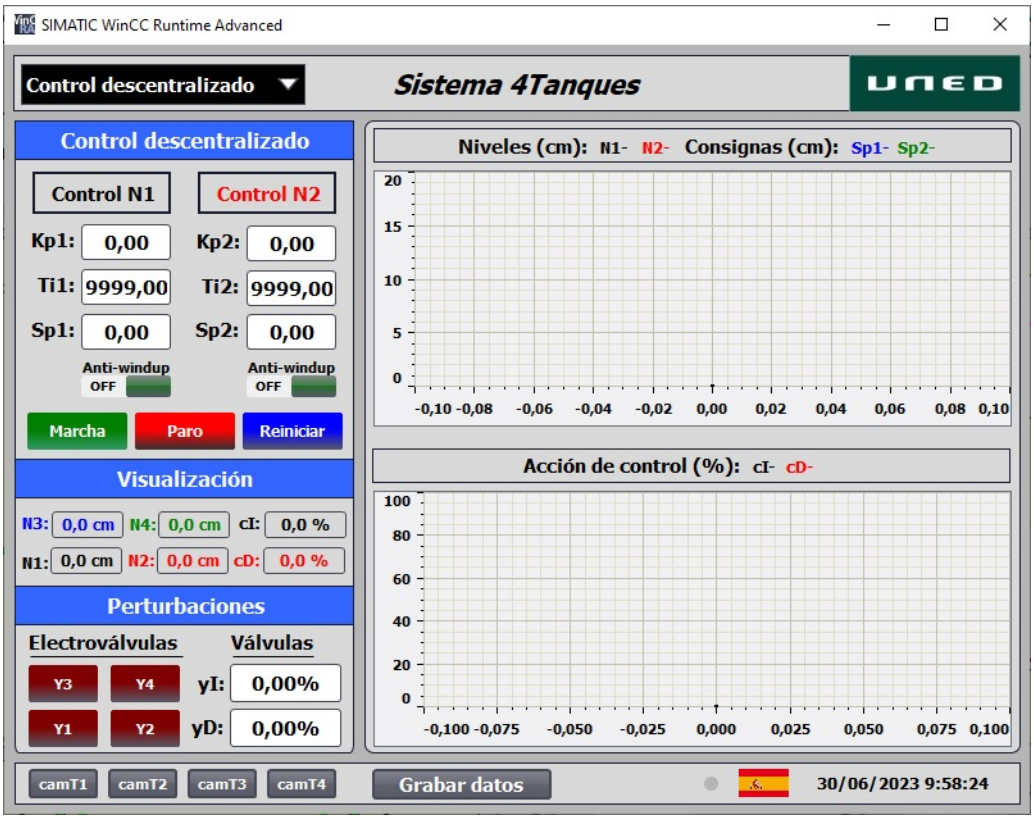


Figura 4.9: Pantalla de control descentralizado.

4.2.2. Pantalla de control descentralizado

En esta pantalla el usuario puede implementar un control descentralizado para regular los niveles de los tanques inferiores T1 y T2 en lazo cerrado, (véase la Figura 4.9). A continuación, se describen las secciones de maniobra y evolución.

Sección de maniobra

La sección de maniobra cuenta con tres paneles como se detallan a continuación.



Figura 4.10: Control descentralizado.

Control descentralizado

En este panel se introducen los parámetros de los controladores PI para llevar a cabo el control descentralizado, (véase la Figura 4.10), pudiéndose poner en marcha de la siguiente forma:

- **Control N1 y N2:** Bajo estas etiquetas se introducen los parámetros de los controladores PI que regulan los niveles de los tanques T1 y T2.
  - **Kp1, Kp2:** En estos campos de entrada se introduce el valor de la ganancia para la acción proporcional (P) que va de $0{,}00$ a $99{,}00$.
  - **Ti1, Ti2:** En estos campos de entrada se introduce el valor de la ganancia para la acción integral (I) que va de $0{,}00$ a $9999{,}00$.
  - **N1r, N2r:** En estos campos de entrada se introduce el valor de la consigna que deben alcanzar los niveles de los tanques T1 y T2 que va de $0{,}00$ a $17{,}00$.

El interruptor Anti-windup y los botones de Marcha, Paro y Reiniciar sirven para realizar las siguientes acciones:

- **Anti-windup:** Este interruptor sirve para activar o desactivar el mecanismo anti-windup del PI en cuestión. Cuando está en verde significa activado y rojo desactivado.

- **Marcha:** Este botón permite la puesta en marcha del controlador y actuadores.
- **Paro:** Este botón permite la puesta en paro del controlador y actuadores.
- **Reiniciar:** Este botón permite la puesta en condiciones iniciales de la planta, es decir, reinicia los valores de los parámetros del controlador, perturbaciones, reinicia las gráficas y desactiva los actuadores.

Visualización

En este panel se puede visualizar el valor de los niveles de los tanques y el valor del caudal de las bombas en tanto por ciento, (véase la Figura 4.11).



Figura 4.11: Panel de visualización.

Perturbaciones

Este panel se utiliza para perturbar los tanques inferiores T1 y T2 ya sea, pulsando S1 o S2 o introduciendo un valor de $0\,\%$ a $100\,\%$ en alguno de los campos entrada yI o yD de las válvulas de control, (véase la Figura 4.12).



Figura 4.12: Panel de perturbaciones.

Sección de evolución

En esta sección se sitúan dos gráficas en las que se recogen las variables controladas, es decir, niveles de los tanques T1 y T2 y las variables manipuladas, esto es, los caudales de las bombas, (véase la Figura 4.13).

En la gráfica superior se representan las medidas de los niveles de los tanques N1, en negro; N2, en rojo; junto con la consigna deseada para el tanque T1, N1r,

representada en azul y la consigna deseada para el tanque T2, N2r, representada en verde.

En la gráfica inferior se representa la evolución de las acciones de control, es decir, los caudales de las bombas cI, en negro y cD, en rojo.

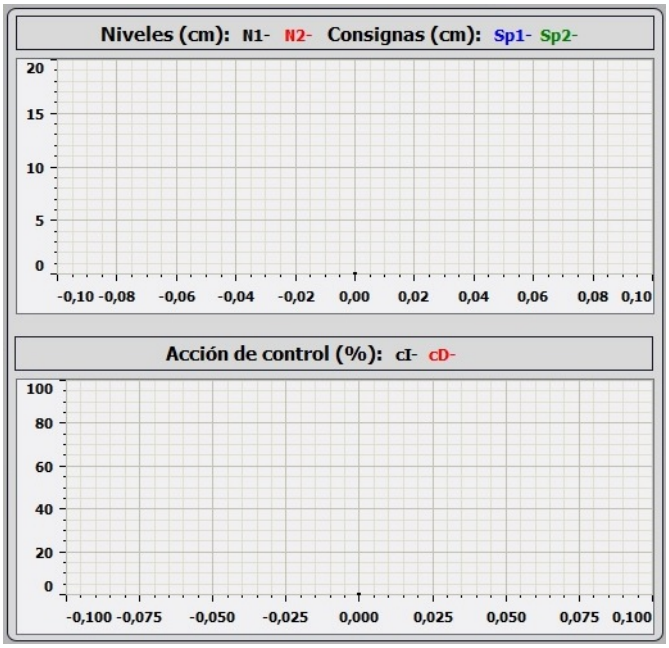


Figura 4.13: Sección de evolución.

4.2.3. Pantalla de control centralizado

En esta pantalla el usuario puede implementar un control centralizado mediante una red de desacoplo directo simplificado (caso 12) configuración A para regular los niveles de los tanques inferiores T1 y T2 en lazo cerrado, (véase la Figura 4.14). A continuación, se describen las secciones de maniobra y evolución.

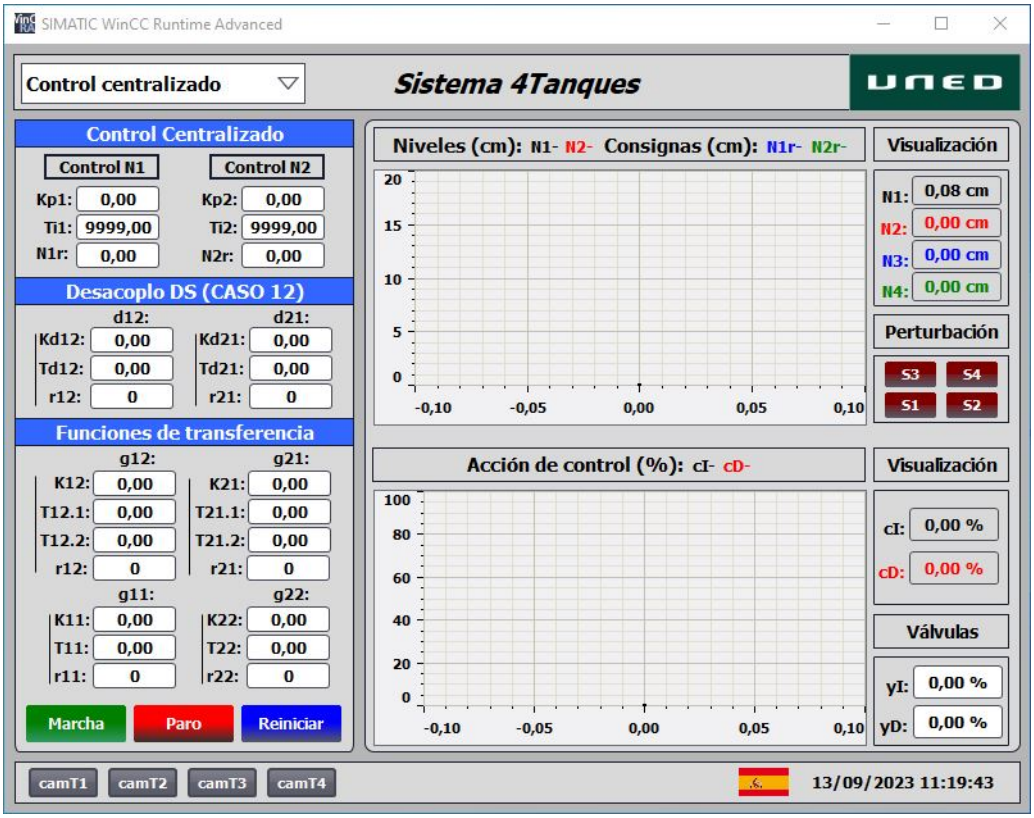


Figura 4.14: Pantalla de control centralizado.

Sección de maniobra

La sección de maniobra cuenta con paneles, como se detallan a continuación.

Control centralizado

En esta parte se introducen los parámetros de los controladores PI y los parámetros de la red de desacoplo para llevar a cabo el control centralizado, (véase la Figura 4.15). Se ponen en marcha de la siguiente forma:

- **Control N1 y N2:** Bajo estas etiquetas se introducen los parámetros de los controladores PI.
  - **Kp1, Kp2:** En estos campos de entrada se introduce el valor de la ganancia para la acción proporcional (P) que va de 0,00 a 99,00.
  - **Ti1, Ti2:** En estos campos de entrada se introduce el valor de la ganancia para la acción integral (I) que va de 0,00 a 9999,00.

- **N1r, N2r:** En estos campos de entrada se introduce el valor de la consigna que deben alcanzar los niveles de los tanques T1 y T2 que van de $0{,}00$ a $17{,}00$.

- **Desacoplo directo simplificado (caso 12):** En esta parte se introducen los parámetros de la red de desacoplo usando funciones de transferencia de primer orden.

  - **Kd12, Kd21:** En estos campos de entrada se introduce el valor de la ganancia estática que va de $-999{,}99$ a $999{,}99$.
  - **Td12, Td21:** En estos campos de entrada se introduce el valor de la constante de tiempo que va de $-999{,}99$ a $999{,}99$.
  - **r12, r21:** En estos campos de entrada se introduce el valor de los retardos de tiempo que va de $0{,}00$ a $50{,}00$.

- **Funciones de transferencia:** En esta parte se introducen los parámetros de las funciones de transferencia obtenidos tras la linealización del sistema real. Para los tanques inferiores se han fijado funciones de transferencia de primer orden y para los tanques superiores funciones de transferencia de segundo orden.

  - **K11, K12, K21, K22:** En estos campos de entrada se introduce el valor de la ganancia estática que va de $-999{,}99$ a $999{,}99$.
  - **T12.1, T12.2, T21.1, T21.2, T11, T22:** En estos campos de entrada se introduce el valor de la constante de tiempo que va de $-999{,}99$ a $999{,}99$.
  - **r11, r12, r21, r22:** En estos campos de entrada se introduce el valor de los retardos de tiempo que va de $0{,}00$ a $50{,}00$.

Los botones de Marcha, Paro y Reiniciar permiten realizar las siguientes acciones:

- **Marcha:** Este botón permite la puesta en marcha del controlador y actuadores.

- **Paro:** Este botón permite la puesta en paro del controlador y actuadores.

- **Reiniciar:** Este botón permite la puesta en condiciones iniciales de la planta, es decir, reinicia los valores de los parámetros del controlador, válvulas, reinicia las gráficas y desactiva los actuadores.

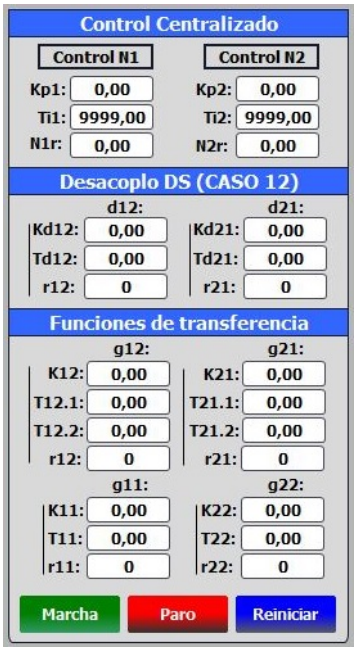


Figura 4.15: Panel de control centralizado.

Sección de evolución

En esta sección se sitúan dos gráficas en las que se recogen las variables controladas, es decir, los niveles de los tanques T1 y T2 y las variables manipuladas, esto es, los caudales de las bombas, (véase la Figura 4.16).

En la gráfica superior se representan las medidas de los niveles de los tanques N1, en negro; N2, en rojo; junto con la consigna deseada para el tanque T1, N1r, representada en azul y la consigna deseada para el tanque T2, N2r, representada en verde. A la derecha de esta gráfica se puede visualizar el valor de los niveles de los tanques y efectuar perturbaciones a través de los botones (S1, S2, S3, S4) mediante un pulso.

En la gráfica inferior se representa la evolución de las acciones de control, es decir, los caudales de las bombas cI, en negro y cD, en rojo. A la derecha de esta gráfica se puede visualizar el valor del caudal de las bombas en tanto por ciento. En la parte de válvulas se fijan los valores de yI e yD como parte del sistema linealizado, es decir, los valores que fueron utilizados para linealizar el sistema real.

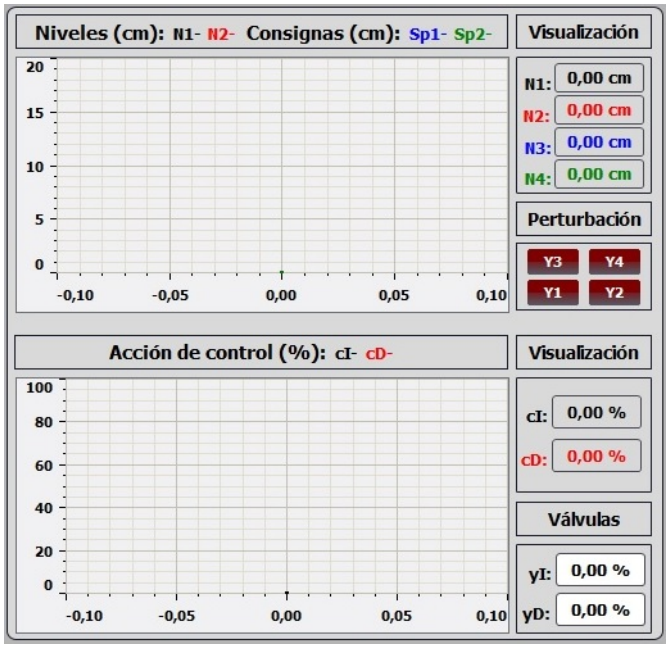


Figura 4.16: Sección de evolución.

Capítulo 5

Puesta en marcha

En este capítulo se pondrá en marcha la planta desde el sistema SCADA, se implementará un controlador PI descentralizado y se detallarán los resultados.

5.1. Identificación

La identificación de sistemas es la teoría y el arte de construir modelos matemáticos de sistemas dinámicos basándonos en las entradas y salidas observadas.

Construir modelos para sistemas desconocidos es un objetivo importante de la ingeniería de control. Estos modelos necesitan simular el comportamiento real en los casos en que existe un conocimiento previo limitado de la estructura del sistema.

La identificación de sistemas no lineales se considera un problema difícil. La razón es que identificar un sistema no lineal conlleva dos grandes etapas: la selección de la estructura del modelo con un cierto número de parámetros y la selección de un algoritmo que estime dichos parámetros [16].

5.1.1. Identificación del sistema en configuración de fase mínima.

Físicamente, la configuración en fase mínima implica que el nivel de los tanques inferiores sea mayor al de los tanques superiores, por tanto, se debe cumplir que $1 < \text{yI} + \text{yD} < 2$, como se explica en [3]. Tras ello se lleva a cabo una identificación en torno al punto de trabajo [cI, cD] = [74, 61.5] % y [yI, yD] = [70, 68] %.

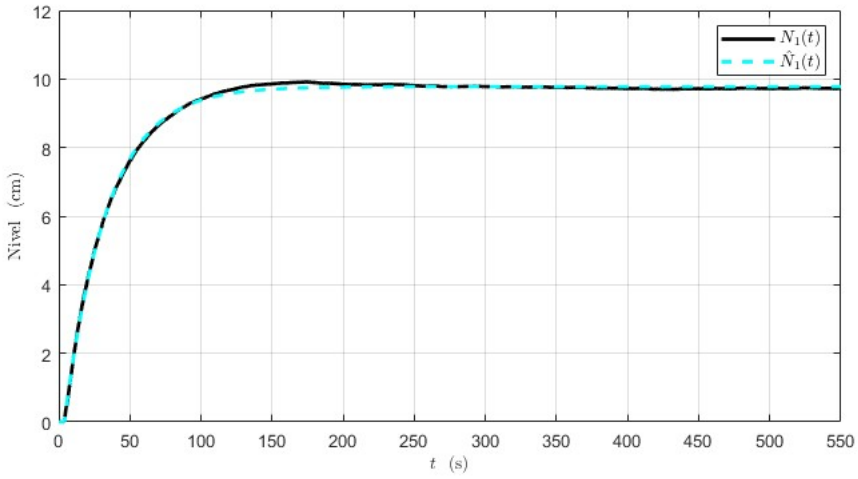


Figura 5.1: Comparación del nivel real de N1 en lazo abierto frente al modelo identificado en configuración de fase mínima.

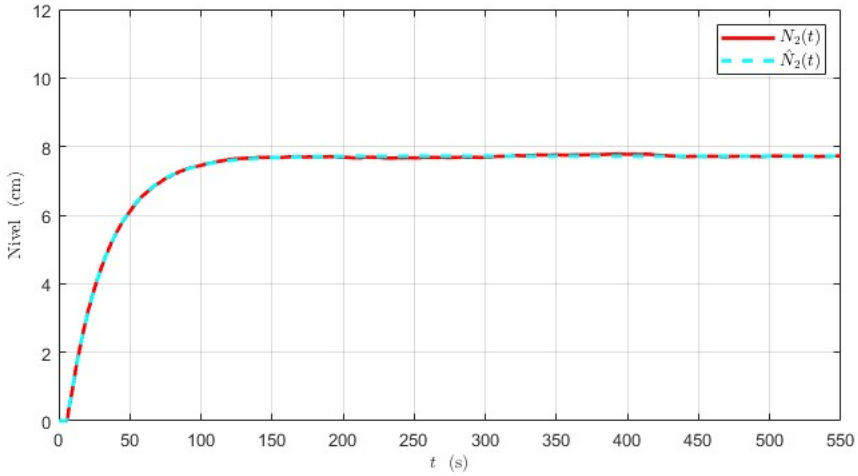


Figura 5.2: Comparación del nivel real de N2 en lazo abierto frente al modelo identificado en configuración de fase mínima.

Para realizar la identificación del proceso se ha utilizado el método de la curva de reacción, el cual consiste en aplicar sobre un sistema en equilibrio una entrada en forma de escalón y observar la respuesta del mismo. Posteriormente, se analiza esta respuesta y se obtiene la función de transferencia del comportamiento del proceso.

De las figuras 5.1 y 5.2 se puede inferir que la respuesta del modelo identificado y la del sistema real son bastante similares, por esta razón, se utilizará el modelo lineal ajustado obtenido para el diseño de la estrategia de control. A continuación se muestra la matriz de funciones de transferencia $G(s)$ obtenida de la identificación.

$$G(s) = \begin{bmatrix} g_{11}(s) & g_{12}(s) \\ \\ g_{21}(s) & g_{22}(s) \end{bmatrix} = \tag{5.1}$$

$$\begin{bmatrix} \dfrac{0{,}1321 \cdot e^{-3{,}98 \cdot s}}{1 + 29{,}96 \cdot s} & \dfrac{0{,}075 \cdot e^{-13 \cdot s}}{(1 + 1 \cdot e^{-6} \cdot s) \cdot (1 + 137{,}25 \cdot s)} \\ \\ \dfrac{0{,}0783 \cdot e^{-21 \cdot s}}{(1 + 1 \cdot e^{-6} \cdot s) \cdot (1 + 94{,}12 \cdot s)} & \dfrac{0{,}1255 \cdot e^{-5{,}89 \cdot s}}{1 + 27{,}92 \cdot s} \end{bmatrix} \tag{5.2}$$

Dicha matriz relaciona los niveles N1 y N2 (en cm) de los tanques a controlar con los caudales de las bombas (en $\%$). Todas estas medidas son relativas al punto de operación utilizado en la identificación cuyo niveles en estado estable son [N1e, N2e] = [9.77, 7.72] cm.

5.2. Controlador PI descentralizado

Es común que las diferentes soluciones a los problemas de control se aborden desde el punto de vista SISO, donde, dados los lazos independientes, una variable sensada es controlada por una variable manipulada. Los dos lazos de control de este proceso son:

- Lazo que relaciona la salida del nivel de T1 con la entrada de caudal de la bomba bI.
- Lazo que relaciona la salida del nivel de T2 con la entrada de caudal de la bomba bD.

En este contexto, los controladores PI y PID han sido los más extendidos ya que su diseño e implementación es relativamente sencillo [15]. Por esta razón, esta sección presenta el diseño de controladores PI descentralizados sin desacople, en los que, un estudio de interacción es desarrollado por medio de la matriz de ganancias relativas de Bristol, con el fin de determinar el emparejamiento adecuado para realizar el control.

5.2.1. Matriz de ganancias relativas (RGA)

Desde que [18] presentara la RGA, ésta se ha convertido en una de las medidas más extendidas para cuantificar la interacción de un proceso multivariable en estado estacionario. La RGA de una matriz compleja y no singular $G(0)$ es otra matriz compleja definida de la siguiente manera:

$$RGA[G(0)] = G(0) * \left(G(0)^{-1}\right)^T \tag{5.3}$$

donde $G(0)$ es la matriz de ganancia en estado estacionario (SSGM).

Cálculo de la RGA.

Para iniciar este cálculo se escoge la combinación de variables que se prevea tenga la menor interacción entre sí, es decir, que cada variable controlada se controle mediante la variable manipulada que tiene mayor influencia sobre ella. Para tomar una decisión acerca de la adecuada selección del par de variables se debe encontrar las ganancias relativas del proceso, las cuales indican cuánto cambia la variable controlada por unidad de cambio de la variable manipulada. Suponiendo esto, se llevará el cálculo de la RGA de la siguiente forma.

Primero se determina la matriz de ganancias en estado estacionario $G(0)$, como se muestra a continuación.

$$SSGM = G(0) = \begin{bmatrix} 0{,}1321 & 0{,}0750 \\ \\ 0{,}0783 & 0{,}1255 \end{bmatrix} \tag{5.4}$$

Aplicando la ecuación (5.3), la matriz RGA queda de la siguiente manera.

$$RGA = \begin{bmatrix} 1{,}5486 & -0{,}5486 \\ \\ -0{,}5486 & 1{,}5486 \end{bmatrix} \tag{5.5}$$

Los resultados obtenidos en (5.5) indican que el emparejamiento de la forma cI - N1 y cD - N2 es el adecuado y también que los valores $1{,}5486$ indican un grado de interacción medio bajo.

5.2.2. Diseño del controlador PI descentralizado para fase mínima

Para diseñar dos controladores PI descentralizados, es posible ver el sistema como dos lazos SISO independientes, caracterizados por los elementos de la matriz de funciones de transferencia que tienen mayor dominio sobre el sistema, como se ilustra en la figura 5.3.

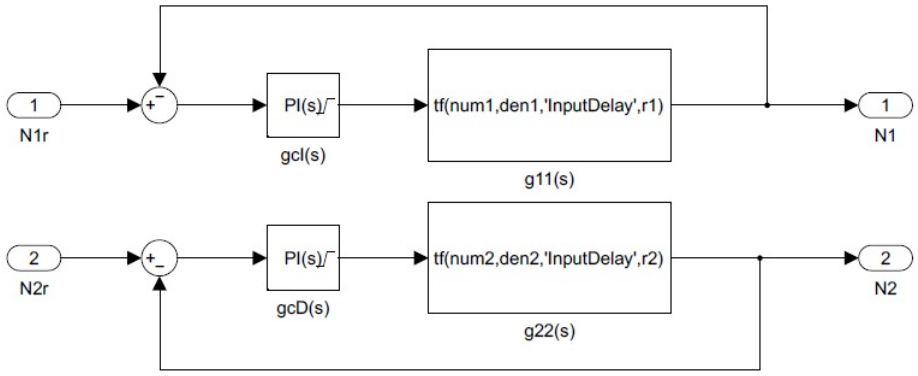


Figura 5.3: Sistema visto como dos lazos independientes.

La sintonía se ha realizado utilizando la herramienta PID Tuner App disponible en el software Simulink de MATLAB [19]. En la tabla 5.1 se muestran los parámetros de los PI obtenidos.

Tabla 5.1: Parámetros de los dos controladores PI.

Lazo de control	Kp	Ti
Lazo 1	35	38
Lazo 2	25	45

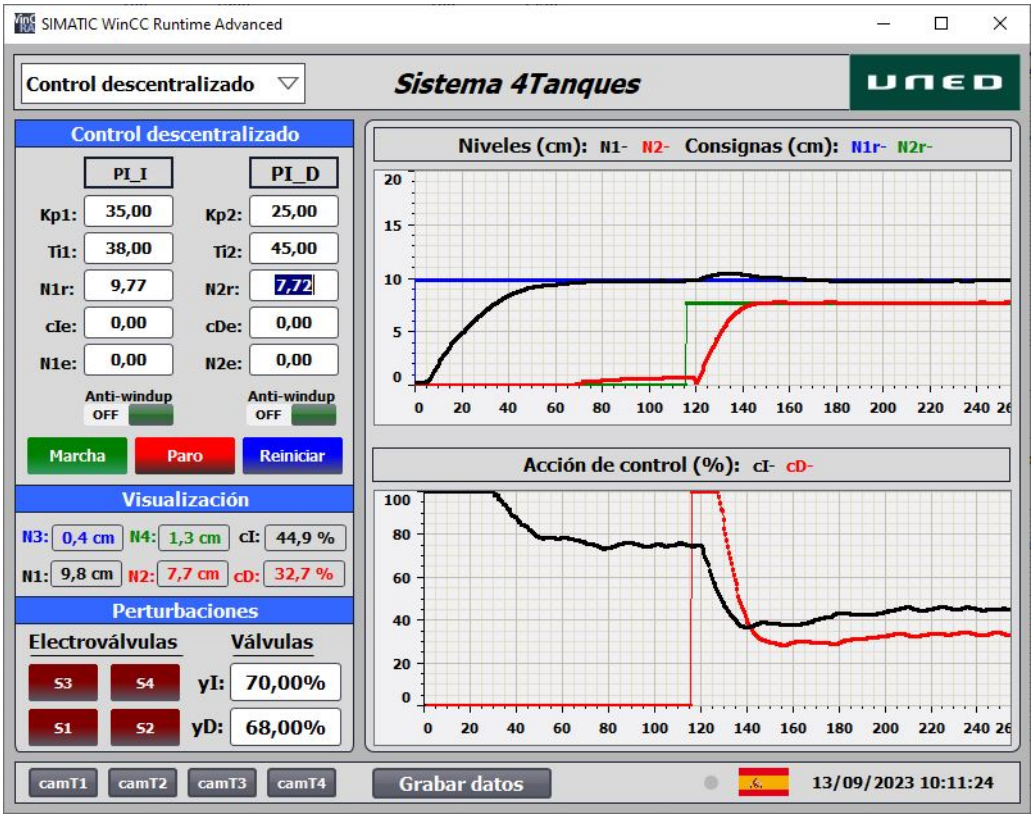


Figura 5.4: Respuesta del sistema ante entrada escalón gobernado por dos controladores PI descentralizados.

Como puede observarse en los resultados de la Figura 5.4, las salidas en estado estacionario alcanzan las consignas al implementar el control descentralizado. Sin embargo, se pueden ver los efectos de la interacción cuando se aplica el escalón a la salida N2, la salida N1 presenta un sobrepico de $\approx 6\,\mathrm{mm}$ antes de recuperarse.

Respuesta del sistema ante perturbaciones

A continuación, se muestra la respuesta del sistema ante los efectos de abrir las electroválvulas Y1, Y2, Y3 y Y4. En las Figuras 5.5 y 5.6 se puede observar que las perturbaciones de un aumento o disminución de $\approx 1\,\mathrm{cm}$ en el nivel que se producen en un lazo no afectan al otro y viceversa.

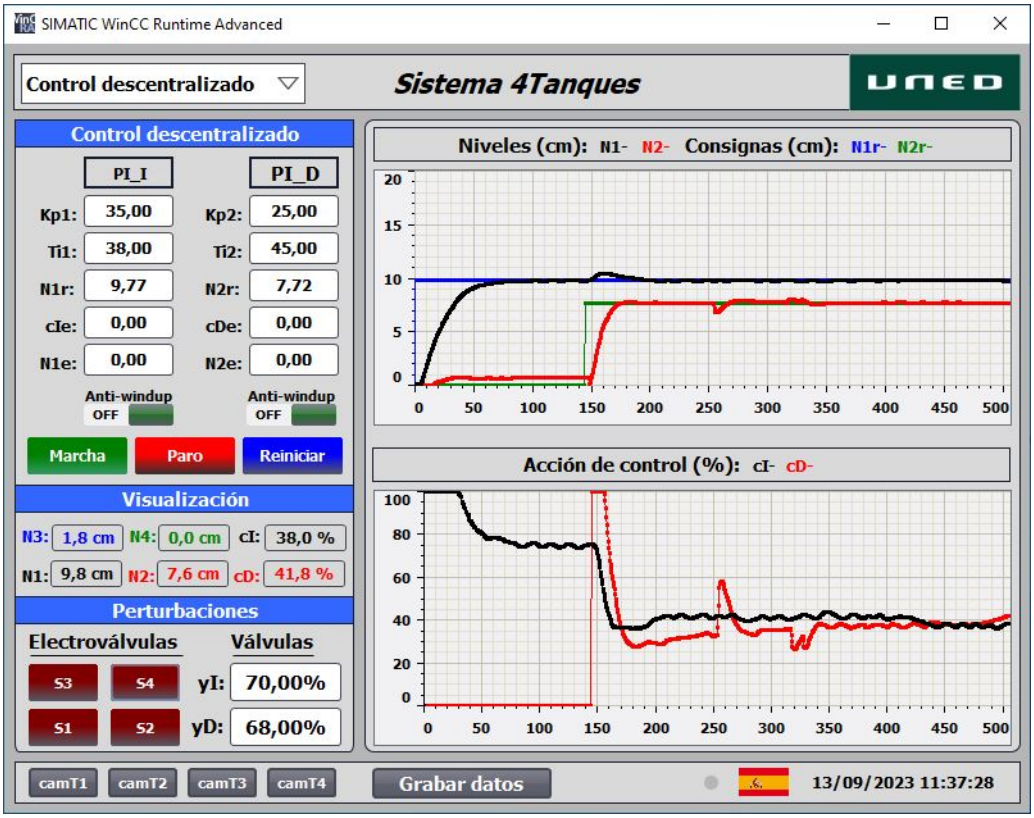


Figura 5.5: Respuesta del sistema ante los efectos de abrir Y2 y Y4.

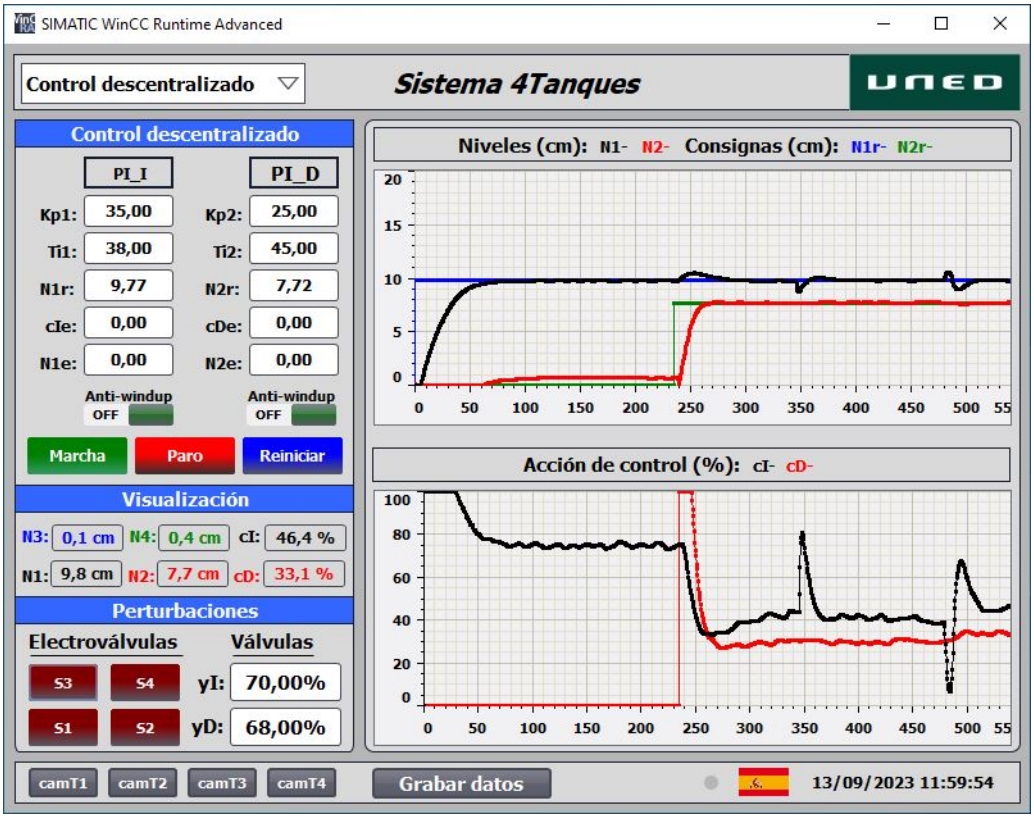


Figura 5.6: Respuesta del sistema ante los efectos de abrir Y1 y Y3.

Capítulo 6

Conclusiones

El principal logro de este proyecto ha sido conseguir actualizar y automatizar la planta de cuatro tanques utilizando componentes industriales mediante un PLC y un sistema SCADA de forma local o remota, que fue el objetivo principal de este proyecto.

Para poder alcanzar el objetivo principal con éxito, tuvimos que superar cada uno de los objetivos secundarios, resolviendo gran parte de los problemas que se presentaron durante el desarrollo.

Se dedicó mucho tiempo y esfuerzo al reajuste de la planta, ya que la misma estaba muy descompensada. Para lograr compensar la planta se reformó el circuito hidráulico y se cambiaron de posición las sondas de caudal, se calibraron las válvulas de control, se limpiaron las bombas, se cambiaron las arandelas para fijar la sección de los desagües y se repararon todas las fugas. Del mismo modo, tuvimos que reformar el cuadro eléctrico, puesto que se encontraba mal cableado, con secciones de los cables incorrectas y estaba falta de aparellaje.

Otro aspecto importante a resaltar es que al tratarse de una planta casera, es decir, hecha a mano y con muchas irregularidades en el diseño, esto enriquece la experimentabilidad por las distintas dinámicas que presenta.

Cabe destacar que para el diseño del sistema de control se ha utilizado el controlador SIMATIC S7-1500 modelo 1516-3 PN/DP del fabricante SIEMENS que se integra perfectamente al TIA Portal. Es la gamma más alta de PLC que tiene el fabricante SIEMENS por su potencia y eficiencia en cuanto a la automatización de sistemas complejos. Además, ofrece seguridad al máximo nivel, incluyendo autorización y protección de los componentes, así como la integridad de las comunicaciones.

Una parte esencial de la automatización de la planta es el sistema SCADA, el cual nos permite interactuar con la planta de forma local o remota. El diseño

de la interfaz no fue un problema, ya que WinCC RT Advanced viene integrado en TIA Portal. A través de la interfaz se puede poner en marcha la planta en modo manual y también permite la implementación de un controlador PI descentralizado y un controlador PI centralizado. Asimismo, incluye una administración de usuarios con el objetivo de otorgar distintos privilegios a diferentes usuarios (Administrador, estudiante). Otras funcionalidades de la que dispone la interfaz son la grabación de las señales más importantes del proceso y la visualización de la planta mediante cámaras para que el usuario pueda ver lo que sucede con la planta. Cabe señalar que se puede acceder a la planta de cuatro tanques lanzando el sistema SCADA a través de la plataforma University Network of Interactive Laboratories (UNILabs). https://unilabs.dia.uned.es/

Se ha llevado a cabo la implementación física de un controlador PI descentralizado. Para configurar adecuadamente la planta tuvimos que reducir las secciones de los desagües, ya que las bombas no eran capaces de suministrar suficiente caudal para alcanzar la consigna. Tras configurar adecuadamente la planta en fase mínima y llegar a un punto de trabajo estacionario, se ha identificado el proceso MIMO. Sobre dicho proceso, que muestra un cierto grado de interacción, se ha desarrollado una estrategia de control descentralizada con dos PI. Se han realizado varios ensayos experimentales que muestran como con dicho controlador se consigue un buen seguimiento de la consigna y se reducen las interacciones entre los lazos. Por otra parte, no se pudo configurar la planta en fase no mínima porque no contamos con las arandelas adecuadas para fijar las secciones de los desagües de los tanques.

Trabajos futuros

- Configurar la planta en fase no mínima e implementar el control descentralizado.
- La implementación de otros tipos de controladores más complejos y otros esquemas de anti-windup en el entorno TIA Portal.
- Diseñar funciones que permitan la visualización en la interfaz del modelo analítico y el modelo identificado frente al sistema real.
- Someter la planta a los efectos de ataques ciberfísicos.

Referencias

[1] Johansson, K. H., & Nunes, J. L. R. (1998, June). *A multivariable laboratory process with an adjustable zero*. In American Control Conference, 1998. Proceedings of the 1998 (Vol. 4, pp. 2045-2049). IEEE.

[2] Johansson, K. H., Horch, A., Wijk, O., & Hansson, A. (1999). *Teaching multivariable control using the quadruple-tank process*. In Decision and Control, 1999. Proceedings of the 38th IEEE Conference on (Vol. 1, pp. 807-812). IEEE.

[3] Johansson, K. H. (2000). The quadruple-tank process: *A multivariable laboratory process with an adjustable zero*. Control Systems Technology, IEEE Transactions on, 8(3), 456-465.

[4] Nunes, J. L. (1998). *Modeling and Control of the Quadruple-Tank Process*. [Máster tesis, Lund Institute of Technology].

[5] Sánchez Moreno, J. *Guión de prácticas: El sistema de cuatro tanques*.

[6] Chacón Sombría , J. (2011). *Desarrollo de un Laboratorio Remoto para el control por eventos de una planta de cuatro tanques acoplados*. [Trabajo fin de máster, UNED].

[7] SIEMENS. (2022). *Manual del producto SIMATIC S7 1500. CPU 1516-3 PN/DP (6ES7516-3AP03-0AB0)*. https://support.industry.siemens.com

[8] SIEMENS. (2022). *Manual del producto SIMATIC S7-1500 / ET 200MP. Módulo de entradas digitales DI 32x24VDC HF (6ES7521-1BL00-0AB0)*. https://support.industry.siemens.com

[9] SIEMENS. (2018). *Manual del producto SIMATIC S7-1500 / ET 200MP. Módulo de salidas digitales DQ 32x24VDC/0.5A HF (6ES7522-1BL01-0AB0)*. https://support.industry.siemens.com

[10] SIEMENS. (2018). *Manual del producto SIMATIC S7-1500 / ET 200MP. Módulo de entradas analógicas AI 8xU/I/RTD/TC ST (6ES7531-7KF00-0AB0)*. https://support.industry.siemens.com

[11] SIEMENS. (2018). *Manual del producto SIMATIC S7-1500 / ET 200MP. Módulo de salidas analógicas AQ 4xU/I ST (6ES7532-5HD00-0AB0)*. https://support.industry.siemens.com

[12] Åström, K., Hägglund, T. (2009). *Control PID avanzado*. PEARSON EDUCACIÓN.

[13] Wikipedia. *SCADA*. https://es.wikipedia.org/wiki/SCADA

[14] Morilla, F. (2013). *Tema 4: Control por desacoplo. Asignatura de control multivariable*.

[15] Garrido, J. (2012). *Diseño de sistemas de control multivariable por desacoplo con controladores PID*. [Tesis doctoral, UNED], 19-22.

[16] Garrido, S. (1999). *Identificación, Estimación y Control de Sistemas No-lineales mediante RGO*. [Tesis doctoral, UC3M]. http://roboticslab.uc3m.es

[17] Martínez Bueno, A. (2011). *Identificación experimental de sistemas. Sistemas de Control Automático*. https://rua.ua.es

[18] Bristol, E. H. (1966). *On a new measure of interactions for multivariable process control*. IEEE Trans. Auto. Cont., AC-11, 133-134.

[19] MathWorks. *PID Tuner. Ajustar controladores PID* https://es.mathworks.com

Apéndices

Códigos

4Tanques / PLC [CPU 1516-3 PN/DP] / Bloques de programa / 00_RECABLEADO

eDigitales [DB1]

eDigitales Propiedades							
General							
Nombre	eDigitales	**Número**	1	**Tipo**	DB	**Idioma**	DB
Numeración	Manual						
Información							
Título		**Autor**	Alex Espinal	**Comentario**		**Familia**	
Versión	0.1	**ID personalizado**					

eDigitales

Nombre	Tipo de datos	Valor de arranque	Remanencia	Accesible desde HMI/OPC UA/Web API	Escribible desde HMI/ OPC UA/ Web API	Visible en HMI Engineering	Valor de ajuste	Supervisión	Comentario
▼ Static									
Conf_Variador_bI_Nok	Bool	false	False	True	True	True	False		Confirmación de variador bomba izquierda Nok
Conf_Variador_bD_Nok	Bool	false	False	True	True	True	False		Confirmación de variador bomba derecha Nok
Conf_Variador_bI_Ok	Bool	false	False	True	True	True	False		Confirmación de variador bomba izquierda Ok
Conf_Variador_bD_Ok	Bool	false	False	True	True	True	False		Confirmación de variador bomba derecha Ok
Conf_KbI_Ok	Bool	false	False	True	True	True	False		Confirmación del contactor bomba izquierda Ok
Conf_KbD_Ok	Bool	false	False	True	True	True	False		Confirmación del contactor bomba derecha Ok
Conf_Kcr_Ok	Bool	false	False	True	True	True	False		Confirmación del contactor compresor de aire Ok

4Tanques / PLC [CPU 1516-3 PN/DP] / Bloques de programa / 00_RECABLEADO

sDigitales [DB2]

sDigitales Propiedades							
General							
Nombre	sDigitales	**Número**	2	**Tipo**	DB	**Idioma**	DB
Numeración	Manual						
Información							
Título		**Autor**	Alex Espinal	**Comentario**		**Familia**	
Versión	0.1	**ID personalizado**					

sDigitales

Nombre	Tipo de datos	Valor de arranque	Remanencia	Accesible desde HMI/OPC UA/Web API	Escribible desde HMI/ OPC UA/ Web API	Visible en HMI Engineering	Valor de ajuste	Supervisión	Comentario
▼ Static									
bI	Bool	false	False	True	True	True	False		Bomba izquierda
bD	Bool	false	False	True	True	True	False		Bomba derecha
Compresor	Bool	false	False	True	True	True	False		Compresor de aire
Y1	Bool	false	False	True	True	True	False		Electroválvula tanque 1 (perturbación)
Y2	Bool	false	False	True	True	True	False		Electroválvula tanque 2 (perturbación)
Y3	Bool	false	False	True	True	True	False		Electroválvula tanque 3 (perturbación)
Y4	Bool	false	False	True	True	True	False		Electroválvula tanque 4 (perturbación)

4Tanques / PLC [CPU 1516-3 PN/DP] / Bloques de programa / 00_RECABLEADO

eAnalogicas [DB3]

eAnalogicas Propiedades							
General							
Nombre	eAnalogicas	**Número**	3	**Tipo**	DB	**Idioma**	DB
Numeración	Manual						
Información							
Título		**Autor**	Alex Espinal	**Comentario**		**Familia**	
Versión	0.1	**ID personalizado**					

eAnalogicas

Nombre	Tipo de datos	Valor de arranque	Remanencia	Accesible desde HMI/OPC UA/Web API	Escribible desde HMI/OPC UA/Web API	Visible en HMI Engineering	Valor de ajuste	Supervisión	Comentario
▼ Static									
H1	Int	0	False	True	True	True	False		Sonda de nivel del tanque 1
H2	Int	0	False	True	True	True	False		Sonda de nivel del tanque 2
H3	Int	0	False	True	True	True	False		Sonda de nivel del tanque 3
H4	Int	0	False	True	True	True	False		Sonda de nivel del tanque 4
C1	Int	0	False	True	True	True	False		Sonda de caudal del tanque 1
C2	Int	0	False	True	True	True	False		Sonda de caudal del tanque 2
C3	Int	0	False	True	True	True	False		Sonda de caudal del tanque 3
C4	Int	0	False	True	True	True	False		Sonda de caudal del tanque 4

4Tanques / PLC [CPU 1516-3 PN/DP] / Bloques de programa / 00_RECABLEADO

sAnalogicas [DB4]

sAnalogicas Propiedades							
General							
Nombre	sAnalogicas	**Número**	4	**Tipo**	DB	**Idioma**	DB
Numeración	Manual						
Información							
Título		**Autor**	Alex Espinal	**Comentario**		**Familia**	
Versión	0.1	**ID personalizado**					

sAnalogicas

Nombre	Tipo de datos	Valor de arranque	Remanencia	Accesible desde HMI/OPC UA/Web API	Escribible desde HMI/ OPC UA/ Web API	Visible en HMI Engineering	Valor de ajuste	Supervisión	Comentario
▼ Static									
cI	Int	0	False	True	True	True	False		Variador de caudal bomba izquierda
cD	Int	0	False	True	True	True	False		Variador de caudal bomba derecha
yI	Int	0	False	True	True	True	False		Regulador válvula de tres vías izquierda
yD	Int	0	False	True	True	True	False		Regulador válvula de tres vías derecha

4Tanques / PLC [CPU 1516-3 PN/DP] / Bloques de programa / 01_MANIOBRA_HMI

VariablesHMI [DB101]

VariablesHMI Propiedades							
General							
Nombre	VariablesHMI	**Número**	101	**Tipo**	DB	**Idioma**	DB
Numeración	Manual						
Información							
Título		**Autor**	Alex Espinal	**Comentario**		**Familia**	
Versión	0.1	**ID personalizado**					

VariablesHMI

Nombre	Tipo de datos	Valor de arranque	Remanencia	Accesible desde HMI/OPC UA/Web API	Escribible desde HMI/OPC UA/Web API	Visible en HMI Engineering	Valor de ajuste	Supervisión	Comentario
▼ Static									
Cerrar	Bool	false	False	True	True	True	False		Variable booleana para poner en condiciones iniciales la planta tras cerrar el sistema SCADA.
nPantalla	Int	1	False	True	True	True	False		Variable que almacena el número de pantalla del sistema SCADA.
▼ Marcha	Array[1..8] of Bool		False	True	True	True	False		Arreglo para poner la planta en marcha desde distintas pantallas.
Marcha[1]	Bool	false	False	True	True	True	False		Arreglo para poner la planta en marcha desde distintas pantallas.
Marcha[2]	Bool	false	False	True	True	True	False		Arreglo para poner la planta en marcha desde distintas pantallas.
Marcha[3]	Bool	false	False	True	True	True	False		Arreglo para poner la planta en marcha desde distintas pantallas.
Marcha[4]	Bool	false	False	True	True	True	False		Arreglo para poner la planta en marcha desde distintas pantallas.
Marcha[5]	Bool	false	False	True	True	True	False		Arreglo para poner la planta en marcha desde distintas pantallas.
Marcha[6]	Bool	false	False	True	True	True	False		Arreglo para poner la planta en marcha desde distintas pantallas.
Marcha[7]	Bool	false	False	True	True	True	False		Arreglo para poner la planta en marcha desde distintas pantallas.
Marcha[8]	Bool	false	False	True	True	True	False		Arreglo para poner la planta en marcha desde distintas pantallas.
▼ Paro	Array[1..8] of Bool		False	True	True	True	False		Arreglo para poner la planta en paro desde distintas pantallas.
Paro[1]	Bool	false	False	True	True	True	False		Arreglo para poner la planta en paro desde distintas pantallas.
Paro[2]	Bool	false	False	True	True	True	False		Arreglo para poner la planta en paro desde distintas pantallas.
Paro[3]	Bool	false	False	True	True	True	False		Arreglo para poner la planta en paro desde distintas pantallas.
Paro[4]	Bool	false	False	True	True	True	False		Arreglo para poner la planta en paro desde distintas pantallas.
Paro[5]	Bool	false	False	True	True	True	False		Arreglo para poner la planta en paro desde distintas pantallas.
Paro[6]	Bool	false	False	True	True	True	False		Arreglo para poner la planta en paro desde distintas pantallas.
Paro[7]	Bool	false	False	True	True	True	False		Arreglo para poner la planta en paro desde distintas pantallas.
Paro[8]	Bool	false	False	True	True	True	False		Arreglo para poner la planta en paro desde distintas pantallas.
▼ Reiniciar	Array[1..8] of Bool		False	True	True	True	False		Arreglo para poner la planta en condiciones iniciales desde distintas pantallas.
Reiniciar[1]	Bool	false	False	True	True	True	False		Arreglo para poner la planta en condiciones iniciales desde distintas pantallas.
Reiniciar[2]	Bool	false	False	True	True	True	False		Arreglo para poner la planta en condiciones iniciales desde distintas pantallas.
Reiniciar[3]	Bool	false	False	True	True	True	False		Arreglo para poner la planta en condiciones iniciales desde distintas pantallas.
Reiniciar[4]	Bool	false	False	True	True	True	False		Arreglo para poner la planta en condiciones iniciales desde distintas pantallas.
Reiniciar[5]	Bool	false	False	True	True	True	False		Arreglo para poner la planta en condiciones iniciales desde distintas pantallas.
Reiniciar[6]	Bool	false	False	True	True	True	False		Arreglo para poner la planta en condiciones iniciales desde distintas pantallas.
Reiniciar[7]	Bool	false	False	True	True	True	False		Arreglo para poner la planta en condiciones iniciales desde distintas pantallas.

Nombre	Tipo de datos	Valor de arranque	Remanencia	Accesible desde HMI/OPC UA/Web API	Escribible desde HMI/OPC UA/Web API	Visible en HMI Engineering	Valor de ajuste	Supervisión	Comentario
Reiniciar[8]	Bool	false	False	True	True	True	False		Arreglo para poner la planta en condiciones iniciales desde distintas pantallas.
▼ Tiempo	Array[1..8] of Real		False	True	True	True	False		Arreglo que almacena el valor tiempo para el graficado en distintas pantallas.
Tiempo[1]	Real	0.0	False	True	True	True	False		Arreglo que almacena el valor tiempo para el graficado en distintas pantallas.
Tiempo[2]	Real	0.0	False	True	True	True	False		Arreglo que almacena el valor tiempo para el graficado en distintas pantallas.
Tiempo[3]	Real	0.0	False	True	True	True	False		Arreglo que almacena el valor tiempo para el graficado en distintas pantallas.
Tiempo[4]	Real	0.0	False	True	True	True	False		Arreglo que almacena el valor tiempo para el graficado en distintas pantallas.
Tiempo[5]	Real	0.0	False	True	True	True	False		Arreglo que almacena el valor tiempo para el graficado en distintas pantallas.
Tiempo[6]	Real	0.0	False	True	True	True	False		Arreglo que almacena el valor tiempo para el graficado en distintas pantallas.
Tiempo[7]	Real	0.0	False	True	True	True	False		Arreglo que almacena el valor tiempo para el graficado en distintas pantallas.
Tiempo[8]	Real	0.0	False	True	True	True	False		Arreglo que almacena el valor tiempo para el graficado en distintas pantallas.
▼ MarchaY	Array[1..4] of Bool		False	True	True	True	False		Arreglo para poner en marcha las electroválvulas.
MarchaY[1]	Bool	false	False	True	True	True	False		Arreglo para poner en marcha las electroválvulas.
MarchaY[2]	Bool	false	False	True	True	True	False		Arreglo para poner en marcha las electroválvulas.
MarchaY[3]	Bool	false	False	True	True	True	False		Arreglo para poner en marcha las electroválvulas.
MarchaY[4]	Bool	false	False	True	True	True	False		Arreglo para poner en marcha las electroválvulas.
▼ RegistrarModo	Array[1..4] of Bool		False	True	True	True	False		Arreglo para poner en marcha la grabación de datos desde distintas pantallas.
RegistrarModo[1]	Bool	false	False	True	True	True	False		Arreglo para poner en marcha la grabación de datos desde distintas pantallas.
RegistrarModo[2]	Bool	false	False	True	True	True	False		Arreglo para poner en marcha la grabación de datos desde distintas pantallas.
RegistrarModo[3]	Bool	false	False	True	True	True	False		Arreglo para poner en marcha la grabación de datos desde distintas pantallas.
RegistrarModo[4]	Bool	false	False	True	True	True	False		Arreglo para poner en marcha la grabación de datos desde distintas pantallas.

4Tanques / PLC [CPU 1516-3 PN/DP] / Bloques de programa / 01_MANIOBRA_HMI

eAnalogicaEscalado [DB102]

eAnalogicaEscalado Propiedades							
General							
Nombre	eAnalogicaEscalado	**Número**	102	**Tipo**	DB	**Idioma**	DB
Numeración	Manual						
Información							
Título		**Autor**	Alex Espinal	**Comentario**		**Familia**	
Versión	0.1	**ID personalizado**					

eAnalogicaEscalado

Nombre	Tipo de datos	Valor de arranque	Remanencia	Accesible desde HMI/OPC UA/Web API	Escribible desde HMI/OPC UA/Web API	Visible en HMI Engineering	Valor de ajuste	Supervisión	Comentario
▼ Static									
▼ Sonda	Array[1..8] of Struct		False	True	True	True	False		Estructura para normalizar y escalar las entradas analógicas.
▼ Sonda[1]	Struct		False	True	True	True	False		Estructura para normalizar y escalar las entradas analógicas.
▼ eAnalogica	Array[1..3] of Real		False	True	True	True	False		Arreglo de medida del nivel del tanque 1 en cm en distintas pantallas.
eAnalogica[1]	Real	0.0	False	True	True	True	False		Arreglo de medida del nivel del tanque 1 en cm en distintas pantallas.
eAnalogica[2]	Real	0.0	False	True	True	True	False		Arreglo de medida del nivel del tanque 1 en cm en distintas pantallas.
eAnalogica[3]	Real	0.0	False	True	True	True	False		Arreglo de medida del nivel del tanque 1 en cm en distintas pantallas.
RangoMin	Real	0.0	False	True	True	True	False		Valor mínimo de escalado.
RangoMax	Real	18.8	False	True	True	True	False		Valor máximo de escalado.
LimiteInf	Int	0	False	True	True	True	False		Límite inferior de normalizado.
LimiteSup	Int	27648	False	True	True	True	False		Límite superior de normalizado.
Alarma	Bool	false	False	True	True	True	False		Fallo sonda.
▼ Sonda[2]	Struct		False	True	True	True	False		Estructura para normalizar y escalar las entradas analógicas.
▼ eAnalogica	Array[1..3] of Real		False	True	True	True	False		Arreglo de medida del nivel del tanque 2 en cm en distintas pantallas.
eAnalogica[1]	Real	0.0	False	True	True	True	False		Arreglo de medida del nivel del tanque 1 en cm en distintas pantallas.
eAnalogica[2]	Real	0.0	False	True	True	True	False		Arreglo de medida del nivel del tanque 1 en cm en distintas pantallas.
eAnalogica[3]	Real	0.0	False	True	True	True	False		Arreglo de medida del nivel del tanque 1 en cm en distintas pantallas.
RangoMin	Real	0.0	False	True	True	True	False		Valor mínimo de escalado.
RangoMax	Real	18.7	False	True	True	True	False		Valor máximo de escalado.
LimiteInf	Int	0	False	True	True	True	False		Límite inferior de normalizado.
LimiteSup	Int	27648	False	True	True	True	False		Límite superior de normalizado.
Alarma	Bool	false	False	True	True	True	False		Fallo sonda.
▼ Sonda[3]	Struct		False	True	True	True	False		Estructura para normalizar y escalar las entradas analógicas.
▼ eAnalogica	Array[1..3] of Real		False	True	True	True	False		Arreglo de medida del nivel del tanque 3 en cm en distintas pantallas.
eAnalogica[1]	Real	0.0	False	True	True	True	False		Arreglo de medida del nivel del tanque 1 en cm en distintas pantallas.
eAnalogica[2]	Real	0.0	False	True	True	True	False		Arreglo de medida del nivel del tanque 1 en cm en distintas pantallas.
eAnalogica[3]	Real	0.0	False	True	True	True	False		Arreglo de medida del nivel del tanque 1 en cm en distintas pantallas.
RangoMin	Real	0.0	False	True	True	True	False		Valor mínimo de escalado.
RangoMax	Real	13.6	False	True	True	True	False		Valor máximo de escalado.
LimiteInf	Int	0	False	True	True	True	False		Límite inferior de normalizado.
LimiteSup	Int	27648	False	True	True	True	False		Límite superior de normalizado.
Alarma	Bool	false	False	True	True	True	False		Fallo sonda.
▼ Sonda[4]	Struct		False	True	True	True	False		Estructura para normalizar y escalar las entradas analógicas.
▼ eAnalogica	Array[1..3] of Real		False	True	True	True	False		Arreglo de medida del nivel del tanque 4 en cm en distintas pantallas.
eAnalogica[1]	Real	0.0	False	True	True	True	False		Arreglo de medida del nivel del tanque 1 en cm en distintas pantallas.
eAnalogica[2]	Real	0.0	False	True	True	True	False		Arreglo de medida del nivel del tanque 1 en cm en distintas pantallas.
eAnalogica[3]	Real	0.0	False	True	True	True	False		Arreglo de medida del nivel del tanque 1 en cm en distintas pantallas.
RangoMin	Real	0.0	False	True	True	True	False		Valor mínimo de escalado.
RangoMax	Real	13.7	False	True	True	True	False		Valor máximo de escalado.
LimiteInf	Int	0	False	True	True	True	False		Límite inferior de normalizado.
LimiteSup	Int	27648	False	True	True	True	False		Límite superior de normalizado.
Alarma	Bool	false	False	True	True	True	False		Fallo sonda.

Nombre	Tipo de datos	Valor de arranque	Remanencia	Accesible desde HMI/OPC UA/Web API	Escribible desde HMI/OPC UA/Web API	Visible en HMI Engineering	Valor de ajuste	Supervisión	Comentario
Sonda[5]	Struct		False	True	True	True	False		Estructura para normalizar y escalar las entradas analógicas.
eAnalogica	Array[1..3] of Real		False	True	True	True	False		Arreglo de medida del caudal del tanque 1 en cm3/s en distintas pantallas.
eAnalogica[1]	Real	0.0	False	True	True	True	False		Arreglo de medida del nivel del tanque 1 en cm en distintas pantallas.
eAnalogica[2]	Real	0.0	False	True	True	True	False		Arreglo de medida del nivel del tanque 1 en cm en distintas pantallas.
eAnalogica[3]	Real	0.0	False	True	True	True	False		Arreglo de medida del nivel del tanque 1 en cm en distintas pantallas.
RangoMin	Real	0.0	False	True	True	True	False		Valor mínimo de escalado.
RangoMax	Real	218.9951	False	True	True	True	False		Valor máximo de escalado.
LimiteInf	Int	0	False	True	True	True	False		Límite inferior de normalizado.
LimiteSup	Int	27648	False	True	True	True	False		Límite superior de normalizado.
Alarma	Bool	false	False	True	True	True	False		Fallo sonda.
Sonda[6]	Struct		False	True	True	True	False		Estructura para normalizar y escalar las entradas analógicas.
eAnalogica	Array[1..3] of Real		False	True	True	True	False		Arreglo de medida del caudal del tanque 2 en cm3/s en distintas pantallas.
eAnalogica[1]	Real	0.0	False	True	True	True	False		Arreglo de medida del nivel del tanque 1 en cm en distintas pantallas.
eAnalogica[2]	Real	0.0	False	True	True	True	False		Arreglo de medida del nivel del tanque 1 en cm en distintas pantallas.
eAnalogica[3]	Real	0.0	False	True	True	True	False		Arreglo de medida del nivel del tanque 1 en cm en distintas pantallas.
RangoMin	Real	0.0	False	True	True	True	False		Valor mínimo de escalado.
RangoMax	Real	219.907	False	True	True	True	False		Valor máximo de escalado.
LimiteInf	Int	0	False	True	True	True	False		Límite inferior de normalizado.
LimiteSup	Int	27648	False	True	True	True	False		Límite superior de normalizado.
Alarma	Bool	false	False	True	True	True	False		Fallo sonda.
Sonda[7]	Struct		False	True	True	True	False		Estructura para normalizar y escalar las entradas analógicas.
eAnalogica	Array[1..3] of Real		False	True	True	True	False		Arreglo de medida del caudal del tanque 3 en cm3/s en distintas pantallas.
eAnalogica[1]	Real	0.0	False	True	True	True	False		Arreglo de medida del nivel del tanque 1 en cm en distintas pantallas.
eAnalogica[2]	Real	0.0	False	True	True	True	False		Arreglo de medida del nivel del tanque 1 en cm en distintas pantallas.
eAnalogica[3]	Real	0.0	False	True	True	True	False		Arreglo de medida del nivel del tanque 1 en cm en distintas pantallas.
RangoMin	Real	0.0	False	True	True	True	False		Valor mínimo de escalado.
RangoMax	Real	163.9425	False	True	True	True	False		Valor máximo de escalado.
LimiteInf	Int	0	False	True	True	True	False		Límite inferior de normalizado.
LimiteSup	Int	27648	False	True	True	True	False		Límite superior de normalizado.
Alarma	Bool	false	False	True	True	True	False		Fallo sonda.
Sonda[8]	Struct		False	True	True	True	False		Estructura para normalizar y escalar las entradas analógicas.
eAnalogica	Array[1..3] of Real		False	True	True	True	False		Arreglo de medida del caudal del tanque 4 en cm3/s en distintas pantallas.
eAnalogica[1]	Real	0.0	False	True	True	True	False		Arreglo de medida del nivel del tanque 1 en cm en distintas pantallas.
eAnalogica[2]	Real	0.0	False	True	True	True	False		Arreglo de medida del nivel del tanque 1 en cm en distintas pantallas.
eAnalogica[3]	Real	0.0	False	True	True	True	False		Arreglo de medida del nivel del tanque 1 en cm en distintas pantallas.
RangoMin	Real	0.0	False	True	True	True	False		Valor mínimo de escalado.
RangoMax	Real	162.5875	False	True	True	True	False		Valor máximo de escalado.
LimiteInf	Int	0	False	True	True	True	False		Límite inferior de normalizado.
LimiteSup	Int	27648	False	True	True	True	False		Límite superior de normalizado.
Alarma	Bool	false	False	True	True	True	False		Fallo sonda.

4Tanques / PLC [CPU 1516-3 PN/DP] / Bloques de programa / 01_MANIOBRA_HMI

sAnalogicaEscalado [DB103]

sAnalogicaEscalado Propiedades							
General							
Nombre	sAnalogicaEscalado	**Número**	103	**Tipo**	DB	**Idioma**	DB
Numeración	Manual						
Información							
Título		**Autor**	Alex Espinal	**Comentario**		**Familia**	
Versión	0.1	**ID personalizado**					

sAnalogicaEscalado

Nombre	Tipo de datos	Valor de arranque	Remanencia	Accesible desde HMI/OPC UA/Web API	Escribible desde HMI/OPC UA/Web API	Visible en HMI Engineering	Valor de ajuste	Supervisión	Comentario
Static									
cI	Struct		False	True	True	True	False		Estructura para el escalado y normalizado del caudal de la bomba izquierda.
sControl	Array[1..8] of Real		False	True	True	True	False		Arreglo de la señal de control.
sControl[1]	Real	0.0	False	True	True	True	False		Arreglo de la señal de control.
sControl[2]	Real	0.0	False	True	True	True	False		Arreglo de la señal de control.
sControl[3]	Real	0.0	False	True	True	True	False		Arreglo de la señal de control.
sControl[4]	Real	0.0	False	True	True	True	False		Arreglo de la señal de control.
sControl[5]	Real	0.0	False	True	True	True	False		Arreglo de la señal de control.
sControl[6]	Real	0.0	False	True	True	True	False		Arreglo de la señal de control.
sControl[7]	Real	0.0	False	True	True	True	False		Arreglo de la señal de control.
sControl[8]	Real	0.0	False	True	True	True	False		Arreglo de la señal de control.
RangoMin	Real	0.0	False	True	True	True	False		Valor mínimo de escalado de la señal de control.
RangoMax	Real	100.0	False	True	True	True	False		Valor máximo de escalado de la señal de control.
LimiteInf	Int	0	False	True	True	True	False		Límite inferior de normalizado de la señal de control.
LimiteSup	Int	27648	False	True	True	True	False		Límite superior de normalizado de la señal de control.
cD	Struct		False	True	True	True	False		Estructura para el escalado y normalizado de la del caudal de la bomba derecha.
sControl	Array[1..8] of Real		False	True	True	True	False		Arreglo de la señal de control.
sControl[1]	Real	0.0	False	True	True	True	False		Arreglo de la señal de control.
sControl[2]	Real	0.0	False	True	True	True	False		Arreglo de la señal de control.
sControl[3]	Real	0.0	False	True	True	True	False		Arreglo de la señal de control.
sControl[4]	Real	0.0	False	True	True	True	False		Arreglo de la señal de control.
sControl[5]	Real	0.0	False	True	True	True	False		Arreglo de la señal de control.
sControl[6]	Real	0.0	False	True	True	True	False		Arreglo de la señal de control.
sControl[7]	Real	0.0	False	True	True	True	False		Arreglo de la señal de control.
sControl[8]	Real	0.0	False	True	True	True	False		Arreglo de la señal de control.
RangoMin	Real	0.0	False	True	True	True	False		Valor mínimo de escalado de la señal de control.
RangoMax	Real	100.0	False	True	True	True	False		Valor máximo de escalado de la señal de control.
LimiteInf	Int	0	False	True	True	True	False		Límite inferior de normalizado de la señal de control.
LimiteSup	Int	27648	False	True	True	True	False		Límite superior de normalizado de la señal de control.
yI	Struct		False	True	True	True	False		Estructura para el escalado y normalizado de la válvula izquierda.
sControl	Array[1..8] of Real		False	True	True	True	False		Arreglo de la señal de control.
sControl[1]	Real	0.0	False	True	True	True	False		Arreglo de la señal de control.
sControl[2]	Real	0.0	False	True	True	True	False		Arreglo de la señal de control.
sControl[3]	Real	0.0	False	True	True	True	False		Arreglo de la señal de control.
sControl[4]	Real	0.0	False	True	True	True	False		Arreglo de la señal de control.
sControl[5]	Real	0.0	False	True	True	True	False		Arreglo de la señal de control.
sControl[6]	Real	0.0	False	True	True	True	False		Arreglo de la señal de control.
sControl[7]	Real	0.0	False	True	True	True	False		Arreglo de la señal de control.
sControl[8]	Real	0.0	False	True	True	True	False		Arreglo de la señal de control.
RangoMin	Real	0.0	False	True	True	True	False		Valor mínimo de escalado de la señal de control.
RangoMax	Real	100.0	False	True	True	True	False		Valor máximo de escalado de la señal de control.
LimiteInf	Int	0	False	True	True	True	False		Límite inferior de normalizado de la señal de control.

Nombre	Tipo de datos	Valor de arranque	Remanencia	Accesible desde HMI/OPC UA/Web API	Escribible desde HMI/OPC UA/Web API	Visible en HMI Engineering	Valor de ajuste	Supervisión	Comentario
LimiteSup	Int	27648	False	True	True	True	False		Límite superior de normalizado de la señal de control.
▼ yD	Struct		False	True	True	True	False		Estructura para el escalado y normalizado de la válvula derecha.
▼ sControl	Array[1..8] of Real		False	True	True	True	False		Arreglo de la señal de control.
sControl[1]	Real	0.0	False	True	True	True	False		Arreglo de la señal de control.
sControl[2]	Real	0.0	False	True	True	True	False		Arreglo de la señal de control.
sControl[3]	Real	0.0	False	True	True	True	False		Arreglo de la señal de control.
sControl[4]	Real	0.0	False	True	True	True	False		Arreglo de la señal de control.
sControl[5]	Real	0.0	False	True	True	True	False		Arreglo de la señal de control.
sControl[6]	Real	0.0	False	True	True	True	False		Arreglo de la señal de control.
sControl[7]	Real	0.0	False	True	True	True	False		Arreglo de la señal de control.
sControl[8]	Real	0.0	False	True	True	True	False		Arreglo de la señal de control.
RangoMin	Real	0.0	False	True	True	True	False		Valor mínimo de escalado de la señal de control.
RangoMax	Real	100.0	False	True	True	True	False		Valor máximo de escalado de la señal de control.
LimiteInf	Int	0	False	True	True	True	False		Límite inferior de normalizado de la señal de control.
LimiteSup	Int	27648	False	True	True	True	False		Límite superior de normalizado de la señal de control.

4Tanques / PLC [CPU 1516-3 PN/DP] / Bloques de programa / 01_MANIOBRA_HMI

PI_Modo2 [DB104]

PI_Modo2 Propiedades							
General							
Nombre	PI_Modo2	**Número**	104	**Tipo**	DB	**Idioma**	DB
Numeración	Manual						
Información							
Título		**Autor**	Alex Espinal	**Comentario**		**Familia**	
Versión	0.1	**ID personalizado**					

PI_Modo2

Nombre	Tipo de datos	Valor de arranque	Remanencia	Accesible desde HMI/OPC UA/Web API	Escribible desde HMI/OPC UA/Web API	Visible en HMI Engineering	Valor de ajuste	Supervisión	Comentario
Static									
PIBombaI	Struct		False	True	True	True	False		Controlador PI de la bomba izquierda.
Sp	Real	0.0	False	True	True	True	False		Parámetro que almacena la consigna o referencia deseada.
Kp	Real	0.0	False	True	True	True	False		Parámetro que almacena la ganancia proporcional.
Ti	Real	9999.0	False	True	True	True	False		Parámetro que almacena el tiempo integral.
dt	Real	0.1	False	True	True	True	False		Incremento de tiempo.
e	Real	0.0	False	True	True	True	False		Señal de error (diferencia entre la consigna y la variable del proceso).
I	Real	0.0	False	True	True	True	False		Variable que acumula el valor de la integral.
Cp	Real	0.0	False	True	True	True	False		Variable que almacena el valor de la acción proporcional.
Ci	Real	0.0	False	True	True	True	False		Variable que almacena el valor de la acción integral.
MarchaPI	Array[1..3] of Bool		False	True	True	True	False		Arreglo para poner en marcha el controlador desde distintas pantallas.
MarchaPI[1]	Bool	false	False	True	True	True	False		Arreglo para poner en marcha el controlador desde distintas pantallas.
MarchaPI[2]	Bool	false	False	True	True	True	False		Arreglo para poner en marcha el controlador desde distintas pantallas.
MarchaPI[3]	Bool	false	False	True	True	True	False		Arreglo para poner en marcha el controlador desde distintas pantallas.
PIBombaD	Struct		False	True	True	True	False		Controlador PI de la bomba derecha.
Sp	Real	0.0	False	True	True	True	False		Parámetro que almacena la consigna o referencia deseada.
Kp	Real	0.0	False	True	True	True	False		Parámetro que almacena la ganancia proporcional.
Ti	Real	9999.0	False	True	True	True	False		Parámetro que almacena el tiempo integral.
dt	Real	0.1	False	True	True	True	False		Incremento de tiempo.
e	Real	0.0	False	True	True	True	False		Señal de error (diferencia entre la consigna y la variable del proceso).
I	Real	0.0	False	True	True	True	False		Variable que acumula el valor de la integral.
Cp	Real	0.0	False	True	True	True	False		Variable que almacena el valor de la acción proporcional.
Ci	Real	0.0	False	True	True	True	False		Variable que almacena el valor de la acción integral.
MarchaPI	Array[1..3] of Bool		False	True	True	True	False		Arreglo para poner en marcha el controlador desde distintas pantallas.
MarchaPI[1]	Bool	false	False	True	True	True	False		Arreglo para poner en marcha el controlador desde distintas pantallas.
MarchaPI[2]	Bool	false	False	True	True	True	False		Arreglo para poner en marcha el controlador desde distintas pantallas.
MarchaPI[3]	Bool	false	False	True	True	True	False		Arreglo para poner en marcha el controlador desde distintas pantallas.

4Tanques / PLC [CPU 1516-3 PN/DP] / Bloques de programa / 02_FUNCIONES / FBs

ejeX [FB201]

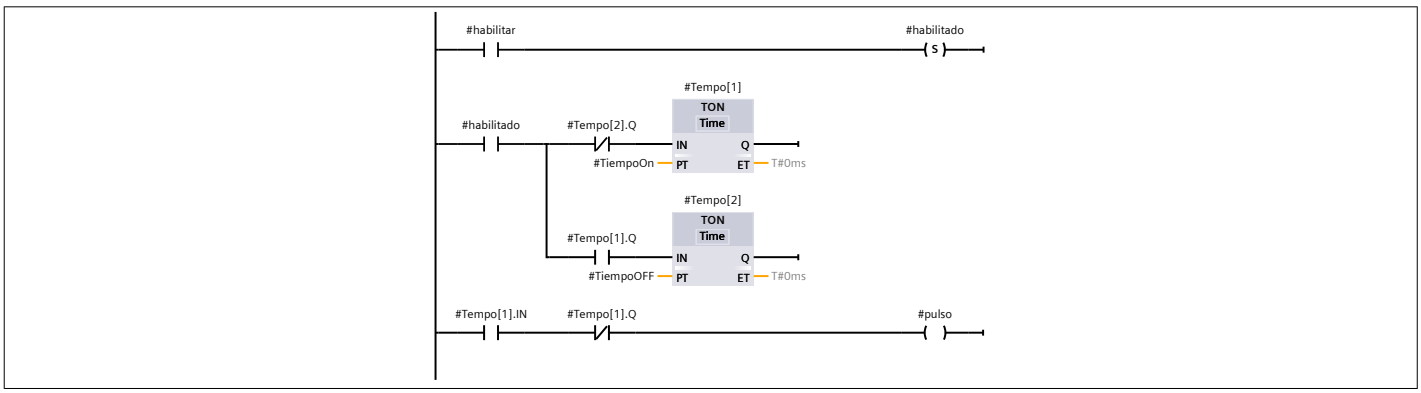
ejeX Propiedades							
General							
Nombre	ejeX	**Número**	201	**Tipo**	FB	**Idioma**	KOP
Numeración	Manual						
Información							
Título	Generador de la variable tiempo.	**Autor**	Alex Espinal	**Comentario**		**Familia**	
Versión	0.1	**ID personalizado**					

ejeX

Nombre	Tipo de datos	Valor predet.	Remanencia	Accesible desde HMI/OPC UA/Web API	Escribible desde HMI/OPC UA/Web API	Visible en HMI Engineering	Valor de ajuste	Supervisión	Comentario
▼ Input									
habilitar	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		Habilitamos el tren de pulsos.
TiempoOn	DInt	0	No remanente	True	True	True	False		Tiempo que el pulso se mantiene activo.
TiempoOFF	DInt	0	No remanente	True	True	True	False		Tiempo que el pulso se mantiene inactivo.
dt	Real	0.1	No remanente	True	True	True	False		Incremento del tiempo.
Reset	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		Reinicio del tiempo.
Output									
▼ InOut									
tiempo	Real	0.0	No remanente	True	True	True	False		Variable de salida que almacena el tiempo.
▼ Static									
▼ Tempo	Array[1..2] of IEC_TIMER		No remanente	True	True	True	False		Es un arreglo de dos temporizadores para la generación del tren de pulsos.
▼ Tempo[1]	IEC_TIMER		No remanente	True	True	True	False		Es un arreglo de dos temporizadores para la generación del tren de pulsos.
PT	Time	T#0ms	No remanente	True	True	True	False		
ET	Time	T#0ms	No remanente	True	False	True	False		
IN	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
Q	Bool	false	No remanente	True	False	True	False		
▼ Tempo[2]	IEC_TIMER		No remanente	True	True	True	False		Es un arreglo de dos temporizadores para la generación del tren de pulsos.
PT	Time	T#0ms	No remanente	True	True	True	False		
ET	Time	T#0ms	No remanente	True	False	True	False		
IN	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
Q	Bool	false	No remanente	True	False	True	False		
pulso	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		La variable pulso.
flanco	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		Variable usada para generar el flanco positivo.
habilitado	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		Variable que indica que el tren de pulsos está en marcha.
Temp									
Constant									

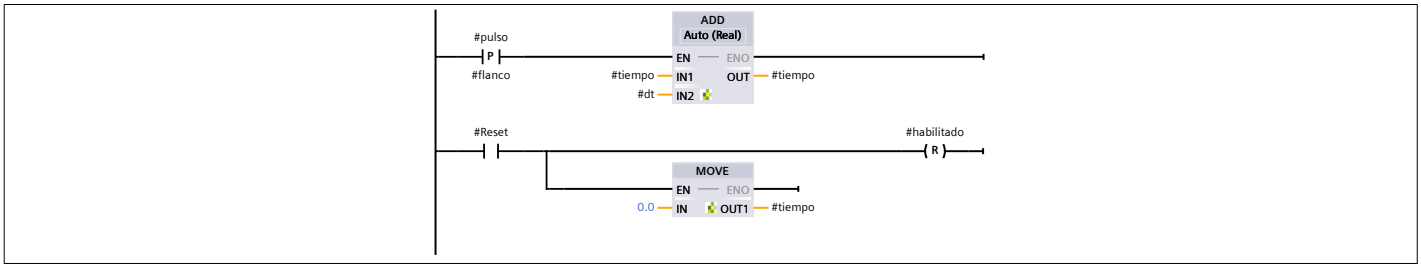
Segmento 1: Generador de pulsos.

Si leemos un true en la variable #habilitar ponemos a set la variable #habilitado y con esto generamos un tren de pulsos usando dos temporizadores TON (a la conexión). En las variables #TiempoOn y #TiempoOFF asignamos los tiempos de subida y bajada. Finalmente la variable #pulso es la salida de este segmento.



Segmento 2: En este segmento generamos el tiempo.

Aquí leemos la variable #pulso en un flanco positivo #flanco y mediante el bloque ADD (sumar) acumulamos el incremento #dt en la variable #tiempo. Por otro lado, si leemos un valor true en la variable #Reset, entonces desabilitamos la variable #habilitado haciendo un reset y asignamos 0 a la variable #tiempo mediante el bloque MOVE.



4Tanques / PLC [CPU 1516-3 PN/DP] / Bloques de programa / 02_FUNCIONES / FCs

eAnalogica [FC201]

eAnalogica Propiedades							
General							
Nombre	eAnalogica	**Número**	201	**Tipo**	FC	**Idioma**	SCL
Numeración	Manual						
Información							
Título		**Autor**	Alex Espinal	**Comentario**		**Familia**	
Versión	0.1	**ID personalizado**					

eAnalogica			
Nombre	**Tipo de datos**	**Valor predet.**	**Comentario**
▼ Input			
LimInferior	Int		Valor inferior de normalizado.
LimSuperior	Int		Valor superior de normalizado.
RangoMin	Real		Valor máximo de escalado.
RangoMax	Real		Valor mínimo de escalado.
▼ Output			
Alarma	Bool		Fallo sonda
▼ InOut			
Salida	Real		Entrada analógica escalada en unidades de ingenieria.
eAnalogica	Int		Recibe el valor en unidades digitales de la sonda.
▼ Temp			
Norm	Real		Variable temporal que almacena el valor normalizado.
Constant			
▼ Return			
Ret_Val	Void		

```
0001 //Estado de alarma.
0002 //Rebase por exceso de límite inferior o superior de la sonda.
0003 IF #eAnalogica < -4864 OR #eAnalogica > 32511 THEN
0004   //Si esta condición se cumple la variable #Alarma se pone a true indicando que la sonda está en fallo.
0005   #Alarma := TRUE;
0006   RETURN;
0007 ELSE
0008   #Alarma := FALSE;
0009   //Se normaliza el valor de la entrada analógica entre 0 y 27648.
0010   //La instrucción "Normalizar" normaliza el valor de la variable de la entrada VALUE representándolo en una escala
     lineal.
0011   #Norm := NORM_X(MIN := #LimInferior, VALUE := #eAnalogica, MAX := #LimSuperior);
0012   //Se escala el valor normalizado entre un valor máximo y mínimo según la magnitud que estamos midiendo.
0013   //La instrucción "Escalar" permite escalar un número en coma flotante mapeándolo en un determinado rango de valores.
0014   #Salida := SCALE_X(MIN := #RangoMin, VALUE := #Norm, MAX := #RangoMax);
0015   //Limitamos la salida escalada entre los valores máximo y mínimo en cuestión.
0016   IF #Salida < #RangoMin THEN
0017     #Salida := #RangoMin;
0018   ELSIF #Salida > #RangoMax THEN
0019     #Salida := #RangoMax;
0020   END_IF;
0021
0022 END_IF;
0023
0024
```

Símbolo	Dirección	Tipo	Comentario
#Alarma		Bool	Fallo sonda
#eAnalogica		Int	Recibe el valor en unidades digitales de la sonda.
#LimInferior		Int	Valor inferior de normalizado.
#LimSuperior		Int	Valor superior de normalizado.
#Norm		Real	Variable temporal que almacena el valor normalizado.
#RangoMax		Real	Valor mínimo de escalado.
#RangoMin		Real	Valor máximo de escalado.
#Salida		Real	Entrada analógica escalada en unidades de ingenieria.

4Tanques / PLC [CPU 1516-3 PN/DP] / Bloques de programa / 02_FUNCIONES / FCs

sAnalogica [FC202]

sAnalogica Propiedades							
General							
Nombre	sAnalogica	**Número**	202	**Tipo**	FC	**Idioma**	SCL
Numeración	Manual						
Información							
Título		**Autor**		**Comentario**		**Familia**	
Versión	0.1	**ID personalizado**					

sAnalogica			
Nombre	**Tipo de datos**	**Valor predet.**	**Comentario**
▼ Input			
RangoMin	Real		
RangoMax	Real		
LimSuperior	Int		
LimInferior	Int		
▼ Output			
sAnalogica	Int		
▼ InOut			
sControl	Real		
▼ Temp			
Norm	Real		
Constant			
▼ Return			
Ret_Val	Void		

```
0001 //Tratamiento de la señal de control
0002 //Límite superior
0003 IF #sControl > 100.0 THEN
0004   // Statement section IF
0005   #sControl := 100.0;
0006   //Límite inferior
0007 ELSIF #sControl < 0 THEN
0008   // Statement section IF
0009   #sControl := 0;
0010 END_IF;
0011
0012 //Normalizar y escalar salida analógica
0013 #Norm := NORM_X(MIN := #RangoMin, VALUE := #sControl, MAX := #RangoMax);
0014 #sAnalogica := SCALE_X(MIN := #LimInferior, VALUE := #Norm, MAX := #LimSuperior);
0015
0016
0017
```

Símbolo	Dirección	Tipo	Comentario
#LimInferior		Int	
#LimSuperior		Int	
#Norm		Real	
#RangoMax		Real	
#RangoMin		Real	
#sAnalogica		Int	
#sControl		Real	

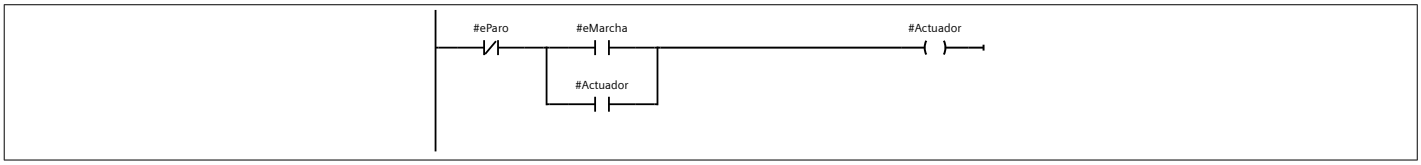
4Tanques / PLC [CPU 1516-3 PN/DP] / Bloques de programa / 02_FUNCIONES / FCs

Actuador [FC203]

Actuador Propiedades							
General							
Nombre	Actuador	**Número**	203	**Tipo**	FC	**Idioma**	KOP
Numeración	Manual						
Información							
Título	Puesta en marcha o paro.	**Autor**		**Comentario**		**Familia**	
Versión	0.1	**ID personalizado**					

Actuador			
Nombre	**Tipo de datos**	**Valor predet.**	**Comentario**
▼ Input			
eMarcha	Bool		Variable para la puesta en marcha del actuador.
eParo	Bool		Variable para la puesta en paro del actuador.
Output			
▼ InOut			
Actuador	Bool		Variable que almacena el estado del actuador.
Temp			
Constant			
▼ Return			
Ret_Val	Void		

Segmento 1: En este segmento ponemos en marcha o paro el actuador y se mantiene enclavado.



4Tanques / PLC [CPU 1516-3 PN/DP] / Bloques de programa / 02_FUNCIONES / FCs

PI [FC204]

PI Propiedades							
General							
Nombre	PI	**Número**	204	**Tipo**	FC	**Idioma**	SCL
Numeración	Manual						
Información							
Título		**Autor**	Alex Espinal	**Comentario**		**Familia**	
Versión	0.1	**ID personalizado**					

PI

Nombre	Tipo de datos	Valor predet.	Comentario
▼ Input			
Habilitar	Bool		Señal booleana para poner en marcha el controlador.
Pv	Real		Señal de la sonda de nivel o variable del proceso.
dt	Real		Incremento de tiempo.
Output			
▼ InOut			
Kp	Real		Parámetro que almacena la ganancia proporcional.
Ti	Real		Parámetro que almacena el tiempo integral.
Sp	Real		Parámetro que almacena la consigna o referencia deseada.
u	Real		Variable que almacena la señal de control o acción de control.
I	Real		Variable que acumula el valor de la integral.
e	Real		Señal de error (diferencia entre la consigna y la variable del proceso).
Cp	Real		Variable que almacena el valor de la acción proporcional.
Ci	Real		Variable que almacena el valor de la acción integral.
Temp			
Constant			
▼ Return			
PI	Void		

```
0001 //Filtrado de la consigna entre los valores máximo y mínimo de trabajo en los tanques inferiores.
0002 IF #Sp > 17.0 THEN
0003   //Si se supera el valor máximo de trabajo entonces la consigna será igual al valor máximo.
0004   #Sp := 17.0;
0005 ELSIF #Sp <= 0.0 THEN
0006   //Si estamos por debajo del valor mínimo de trabajo, entonces la consigna será igual al valor mínimo.
0007   #Sp := 0.0;
0008   #I := 0.0;
0009 END_IF;
0010 //Filtrado de la ganancia proporcional entre un rango de valores máximo y mínimo.
0011 IF #Kp > 99.0 THEN
0012   #Kp := 99.0;
0013 ELSIF #Kp < 0.0 THEN
0014   #Kp := 0.0;
0015 END_IF;
0016 //Filtrado del tiempo integral entre un rango de valores máximo y mínimo.
0017 IF #Ti > 9999.0 THEN
0018   #Ti := 9999.0;
0019 ELSIF #Ti <= 0.0 THEN
0020   #Ti := 0.01;
0021 END_IF;
0022 //Puesta en marcha del controlador.
0023 //Primero habilitamos el controlador con una señal booleana.
0024 IF #Habilitar = TRUE THEN
0025   // Calculamos la señal de error.
0026   #e := #Sp - #Pv;
0027   //Calculamos la acción proporcional.
0028   #Cp := #Kp * #e;
0029   //Calculamos la acción integral.
0030   #Ci := #Kp * #I / #Ti;
0031   //Sumamos las dos acciones anteriores que da como resultado la acción de control PI.
0032   #u := #Cp + #Ci;
0033   //Acumulamos el valor de la integral.
0034   #I := #I + #e * #dt;
0035 ELSE
0036   //En caso de no habilitarse la señal booleana no se calcula el controlador y salimos de la FC
0037   RETURN;
0038 END_IF;
0039 //Filtramos la acción de control entre 0 y 100 porciento.
0040 IF #u > 100.0 THEN
0041   #u := 100.0;
0042 ELSIF #u < 0.0 THEN
0043   #u := 0.0;
0044 END_IF;
```

Símbolo	Dirección	Tipo	Comentario
#Ci		Real	Variable que almacena el valor de la acción integral.
#Cp		Real	Variable que almacena el valor de la acción proporcional.
#dt		Real	Incremento de tiempo.
#e		Real	Señal de error (diferencia entre la consigna y la variable del proceso).
#Habilitar		Bool	Señal booleana para poner en marcha el controlador.

Símbolo	Dirección	Tipo	Comentario
#I		Real	Variable que acumula el valor de la integral.
#Kp		Real	Parámetro que almacena la ganancia proporcional.
#Pv		Real	Señal de la sonda de nivel o variable del proceso.
#Sp		Real	Parámetro que almacena la consigna o referencia deseada.
#Ti		Real	Parámetro que almacena el tiempo integral.
#u		Real	Variable que almacena la señal de control o acción de control.

4Tanques / PLC [CPU 1516-3 PN/DP] / Bloques de programa / 03_PROCEDIMIENTOS

enDigitales [FC301]

enDigitales Propiedades							
General							
Nombre	enDigitales	**Número**	301	**Tipo**	FC	**Idioma**	AWL
Numeración	Manual						
Información							
Título	Mapeo de entradas digi-tales.	**Autor**	Alex Espinal	**Comentario**		**Familia**	
Versión	0.1	**ID personaliza-do**					

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

Segmento 1: En este segmento leemos el estado de las entradas digitales y lo asignamos a las variables intermedias.

```
0001
0002      A     "Conf_Variador_bI_Nok"
0003      =     "eDigitales".Conf_Variador_bI_Nok
0004
0005      A     "Conf_Variador_bD_Nok"
0006      =     "eDigitales".Conf_Variador_bD_Nok
0007
0008      A     "Conf_Variador_bI_Ok"
0009      =     "eDigitales".Conf_Variador_bI_Ok
0010
0011      A     "Conf_Variador_bD_Ok"
0012      =     "eDigitales".Conf_Variador_bD_Ok
0013
0014      A     "Conf_KbI_Ok"
0015      =     "eDigitales".Conf_KbI_Ok
0016
0017      A     "Conf_KbD_Ok"
0018      =     "eDigitales".Conf_KbD_Ok
0019
0020      A     "Conf_Kcr_Ok"
0021      =     "eDigitales".Conf_Kcr_Ok
0022
```

4Tanques / PLC [CPU 1516-3 PN/DP] / Bloques de programa / 03_PROCEDIMIENTOS

enAnalogicas [FC302]

enAnalogicas Propiedades							
General							
Nombre	enAnalogicas	**Número**	302	**Tipo**	FC	**Idioma**	AWL
Numeración	Manual						
Información							
Título	Mapeo de entradas analógicas.	**Autor**	Alex Espinal	**Comentario**		**Familia**	
Versión	0.1	**ID personalizado**					

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

Segmento 1: En este segmento leemos el valor de las entradas analógicas y lo asignamos en las variables intermedias.

```
0001        L     "H1"
0002        T     "eAnalogicas".H1
0003
0004        L     "H2"
0005        T     "eAnalogicas".H2
0006
0007        L     "H3"
0008        T     "eAnalogicas".H3
0009
0010        L     "H4"
0011        T     "eAnalogicas".H4
0012
0013        L     "C1"
0014        T     "eAnalogicas".C1
0015
0016        L     "C2"
0017        T     "eAnalogicas".C2
0018
0019        L     "C3"
0020        T     "eAnalogicas".C3
0021
0022        L     "C4"
0023        T     "eAnalogicas".C4
0024
```

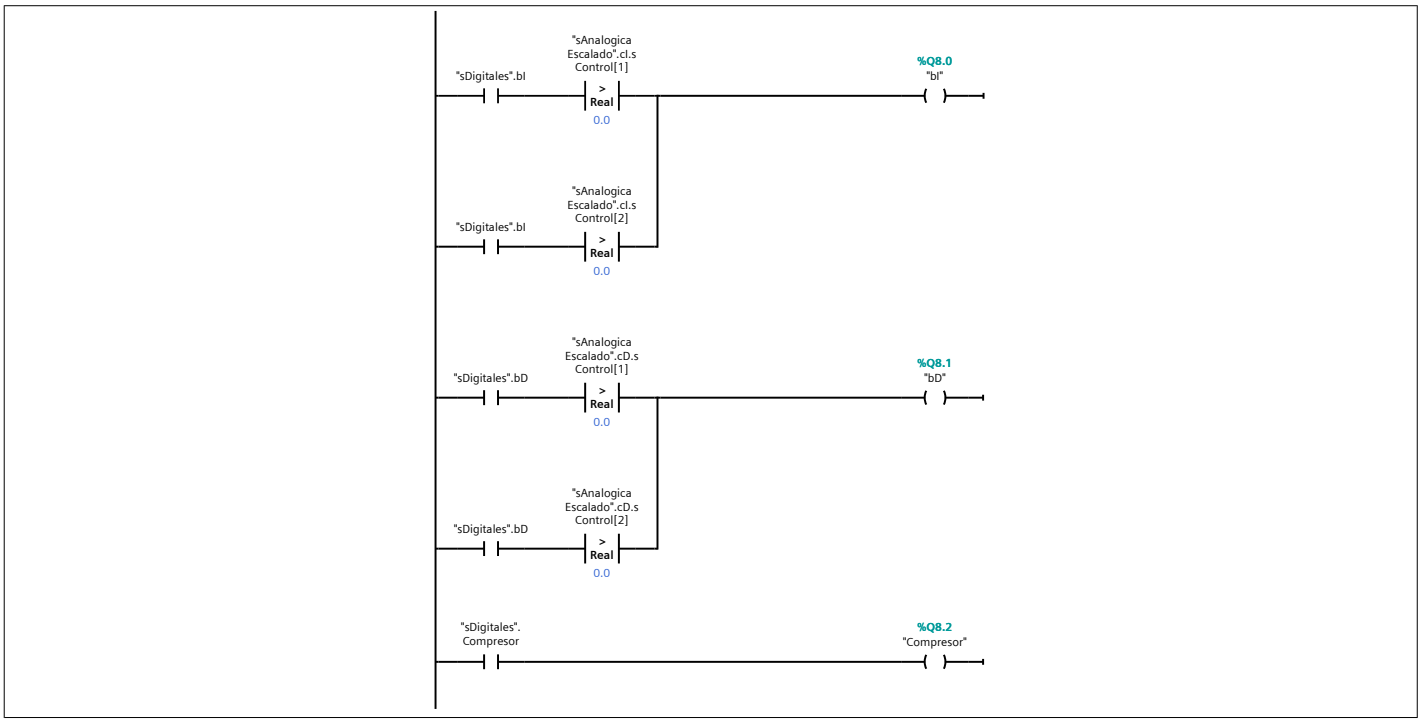
4Tanques / PLC [CPU 1516-3 PN/DP] / Bloques de programa / 03_PROCEDIMIENTOS

saDigitales [FC303]

saDigitales Propiedades							
General							
Nombre	saDigitales	**Número**	303	**Tipo**	FC	**Idioma**	KOP
Numeración	Manual						
Información							
Título	Mapeo de variables interme-dias.	**Autor**	Alex Espinal	**Comentario**		**Familia**	
Versión	0.1	**ID personaliza-do**					

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

Segmento 1: En este segmento leemos el estado de as variables intermedias y lo asignamos a las salidas digitales físicas.



Segmento 2: Activación de electroválvula tanque 1 (perturbación).

```
0001      A     "sDigitales".Y1
0002      =     "Y1"
0003
```

Segmento 3: Activación de electroválvula tanque 2 (perturbación).

```
0001      A     "sDigitales".Y2
0002      =     "Y2"
0003
```

Segmento 4: Activación de electroválvula tanque 3 (perturbación).

```
0001      A     "sDigitales".Y3
0002      =     "Y3"
0003
```

Segmento 5: Activación de electroválvula tanque 4 (perturbación).

```
0001      A     "sDigitales".Y4
```

```
0002       =      "Y4"
0003
```

4Tanques / PLC [CPU 1516-3 PN/DP] / Bloques de programa / 03_PROCEDIMIENTOS

saAnalogicas [FC304]

saAnalogicas Propiedades							
General							
Nombre	saAnalogicas	**Número**	304	**Tipo**	FC	**Idioma**	AWL
Numeración	Manual						
Información							
Título	Mapeo de variables interme-dias.	**Autor**	Alex Espinal	**Comentario**		**Familia**	
Versión	0.1	**ID personaliza-do**					

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

Segmento 1: En este segmento leemos los valores de las variables intermedias y lo asignamos a las salidas analógicas físicas.

```
0001      L     "sAnalogicas".cI
0002      T     "cI"
0003
0004      L     "sAnalogicas".cD
0005      T     "cD"
0006
0007      L     "sAnalogicas".yI
0008      T     "yI"
0009
0010      L     "sAnalogicas".yD
0011      T     "yD"
0012
```

4Tanques / PLC [CPU 1516-3 PN/DP] / Bloques de programa / 03_PROCEDIMIENTOS

Entradas [FC305]

Entradas Propiedades							
General							
Nombre	Entradas	**Número**	305	**Tipo**	FC	**Idioma**	AWL
Numeración	Manual						
Información							
Título	Agrupación de las variables de entrada.	**Autor**	Alex Espinal	**Comentario**		**Familia**	
Versión	0.1	**ID personalizado**					

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

Segmento 1: En este segmento invocamos el procedimiento que agrupa las variables de entradas digitales.

```
0001
0002       CALL  "enDigitales"
0003
```

Segmento 2: En este segmento invocamos el procedimiento que agrupa las variables de entradas analógicas.

```
0001
0002       CALL  "enAnalogicas"
0003
```

4Tanques / PLC [CPU 1516-3 PN/DP] / Bloques de programa / 03_PROCEDIMIENTOS

Procesos [FC306]

Procesos Propiedades							
General							
Nombre	Procesos	**Número**	306	**Tipo**	FC	**Idioma**	KOP
Numeración	Manual						
Información							
Título	Procesos.	**Autor**	Alex Espinal	**Comentario**	En este bloque se invocan todos los procesos llevados a cabo en el proyecto.	**Familia**	
Versión	0.1	**ID personaliza-do**					

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

Segmento 1: En este segmento invocamos un procedimiento que agrupa las funciones que hace el normalizado y escalado de las entradas analógicas.

```
0001
0002        CALL  "Escalado_enAnalogicas"
0003
```

Segmento 2: En este segmento invocamos un procedimiento que agrupa las funciones que hace el escalado y normalizado de las salidas analógicas.

```
0001
0002        CALL  "Escalado_saAnalogicas"
0003
```

Segmento 3: En este segmento invocamos un procedimiento que agrupa los bloques de función para egenerar el eje x.

```
0001
0002        CALL  "ejesXs"
0003
```

Segmento 4: En este segmento invocamos un procedimiento que agrupa las funciones que ponen en marcha o paro los actuadores.

```
0001
0002        CALL  "marchaParo"
0003
```

Segmento 5: En este segmento invocamos una función que pone la planta en condiciones iniciales cuando se cierra la interfaz.

```
0001
0002        CALL  "CerrarRT"
0003
```

4Tanques / PLC [CPU 1516-3 PN/DP] / Bloques de programa / 03_PROCEDIMIENTOS

Salidas [FC307]

Salidas Propiedades							
General							
Nombre	Salidas	**Número**	307	**Tipo**	FC	**Idioma**	KOP
Numeración	Manual						
Información							
Título	Agrupación de las variables de salida.	**Autor**	Alex Espinal	**Comentario**		**Familia**	
Versión	0.1	**ID personalizado**					

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

Segmento 1: En este segmento invocamos el procedimiento que agrupa las variables de salidas digitales.

```
0001
0002       CALL  "saDigitales"
0003
```

Segmento 2: En este segmento invocamos el procedimiento que agrupa las variables de salidas analógicas.

```
0001
0002       CALL  "saAnalogicas"
0003
```

4Tanques / PLC [CPU 1516-3 PN/DP] / Bloques de programa / 03_PROCEDIMIENTOS

Escalado_enAnalogicas [FC308]

Escalado_enAnalogicas Propiedades							
General							
Nombre	Escalado_enAnalogicas	**Número**	308	**Tipo**	FC	**Idioma**	AWL
Numeración	Manual						
Información							
Título	Agrupación de funciones de normalizado y escalado de entradas analógicas.	**Autor**	Alex Espinal	**Comentario**		**Familia**	
Versión	0.1	**ID personaliza-do**					

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

Segmento 1: Normalizado y escalado de la entrada analógica H1 (nivel 1).

```
0001       CALL  "eAnalogica"
0002          LimInferior :="eAnalogicaEscalado".Sonda[1].LimiteInf
0003          LimSuperior :="eAnalogicaEscalado".Sonda[1].LimiteSup
0004          RangoMin    :="eAnalogicaEscalado".Sonda[1].RangoMin
0005          RangoMax    :="eAnalogicaEscalado".Sonda[1].RangoMax
0006          Alarma      :="eAnalogicaEscalado".Sonda[1].Alarma
0007          Salida      :="eAnalogicaEscalado".Sonda[1].eAnalogica["VariablesHMI".nPantalla]
0008          eAnalogica  :="eAnalogicas".H1
0009
```

Segmento 2: Normalizado y escalado de la entrada analógica H2 (nivel 2).

```
0001
0002       CALL  "eAnalogica"
0003          LimInferior :="eAnalogicaEscalado".Sonda[2].LimiteInf
0004          LimSuperior :="eAnalogicaEscalado".Sonda[2].LimiteSup
0005          RangoMin    :="eAnalogicaEscalado".Sonda[2].RangoMin
0006          RangoMax    :="eAnalogicaEscalado".Sonda[2].RangoMax
0007          Alarma      :="eAnalogicaEscalado".Sonda[2].Alarma
0008          Salida      :="eAnalogicaEscalado".Sonda[2].eAnalogica["VariablesHMI".nPantalla]
0009          eAnalogica  :="eAnalogicas".H2
0010
```

Segmento 3: Normalizado y escalado de la entrada analógica H2 (nivel 3).

```
0001       CALL  "eAnalogica"
0002          LimInferior :="eAnalogicaEscalado".Sonda[3].LimiteInf
0003          LimSuperior :="eAnalogicaEscalado".Sonda[3].LimiteSup
0004          RangoMin    :="eAnalogicaEscalado".Sonda[3].RangoMin
0005          RangoMax    :="eAnalogicaEscalado".Sonda[3].RangoMax
0006          Alarma      :="eAnalogicaEscalado".Sonda[3].Alarma
0007          Salida      :="eAnalogicaEscalado".Sonda[3].eAnalogica["VariablesHMI".nPantalla]
0008          eAnalogica  :="eAnalogicas".H3
0009
0010
```

Segmento 4: Normalizado y escalado de la entrada analógica H4 (nivel 4).

```
0001       CALL  "eAnalogica"
0002          LimInferior :="eAnalogicaEscalado".Sonda[4].LimiteInf
0003          LimSuperior :="eAnalogicaEscalado".Sonda[4].LimiteSup
0004          RangoMin    :="eAnalogicaEscalado".Sonda[4].RangoMin
0005          RangoMax    :="eAnalogicaEscalado".Sonda[4].RangoMax
0006          Alarma      :="eAnalogicaEscalado".Sonda[4].Alarma
0007          Salida      :="eAnalogicaEscalado".Sonda[4].eAnalogica["VariablesHMI".nPantalla]
0008          eAnalogica  :="eAnalogicas".H4
0009
0010
```

Segmento 5: Normalizado y escalado de la entrada analógica C1 (caudal 1).

```
0001       CALL  "eAnalogica"
0002          LimInferior :="eAnalogicaEscalado".Sonda[5].LimiteInf
```

```
0003          LimSuperior :="eAnalogicaEscalado".Sonda[5].LimiteSup
0004          RangoMin    :="eAnalogicaEscalado".Sonda[5].RangoMin
0005          RangoMax    :="eAnalogicaEscalado".Sonda[5].RangoMax
0006          Alarma      :="eAnalogicaEscalado".Sonda[5].Alarma
0007          Salida      :="eAnalogicaEscalado".Sonda[5].eAnalogica["VariablesHMI".nPantalla]
0008          eAnalogica  :="eAnalogicas".C1
0009
```

Segmento 6: Normalizado y escalado de la entrada analógica C2 (caudal 2).

```
0001       CALL  "eAnalogica"
0002          LimInferior :="eAnalogicaEscalado".Sonda[6].LimiteInf
0003          LimSuperior :="eAnalogicaEscalado".Sonda[6].LimiteSup
0004          RangoMin    :="eAnalogicaEscalado".Sonda[6].RangoMin
0005          RangoMax    :="eAnalogicaEscalado".Sonda[6].RangoMax
0006          Alarma      :="eAnalogicaEscalado".Sonda[6].Alarma
0007          Salida      :="eAnalogicaEscalado".Sonda[6].eAnalogica["VariablesHMI".nPantalla]
0008          eAnalogica  :="eAnalogicas".C2
0009
```

Segmento 7: Normalizado y escalado de la entrada analógica C3 (caudal 3).

```
0001       CALL  "eAnalogica"
0002          LimInferior :="eAnalogicaEscalado".Sonda[7].LimiteInf
0003          LimSuperior :="eAnalogicaEscalado".Sonda[7].LimiteSup
0004          RangoMin    :="eAnalogicaEscalado".Sonda[7].RangoMin
0005          RangoMax    :="eAnalogicaEscalado".Sonda[7].RangoMax
0006          Alarma      :="eAnalogicaEscalado".Sonda[7].Alarma
0007          Salida      :="eAnalogicaEscalado".Sonda[7].eAnalogica["VariablesHMI".nPantalla]
0008          eAnalogica  :="eAnalogicas".C3
0009
```

Segmento 8: Normalizado y escalado de la entrada analógica C4 (caudal 4).

```
0001       CALL  "eAnalogica"
0002          LimInferior :="eAnalogicaEscalado".Sonda[8].LimiteInf
0003          LimSuperior :="eAnalogicaEscalado".Sonda[8].LimiteSup
0004          RangoMin    :="eAnalogicaEscalado".Sonda[8].RangoMin
0005          RangoMax    :="eAnalogicaEscalado".Sonda[8].RangoMax
0006          Alarma      :="eAnalogicaEscalado".Sonda[8].Alarma
0007          Salida      :="eAnalogicaEscalado".Sonda[8].eAnalogica["VariablesHMI".nPantalla]
0008          eAnalogica  :="eAnalogicas".C4
0009
```

4Tanques / PLC [CPU 1516-3 PN/DP] / Bloques de programa / 03_PROCEDIMIENTOS

Escalado_saAnalogicas [FC309]

Escalado_saAnalogicas Propiedades							
General							
Nombre	Escalado_saAnalogicas	**Número**	309	**Tipo**	FC	**Idioma**	AWL
Numeración	Manual						
Información							
Título	Agrupación de funciones de escalado y normalizado de salidas analógicas.	**Autor**	Alex Espinal	**Comentario**		**Familia**	
Versión	0.1	**ID personaliza-do**					

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

Segmento 1: Escalado y normalizado de salida analógica cI (caudal bomba izquierda).

```
0001       CALL  "sAnalogica"
0002          RangoMin    :="sAnalogicaEscalado".cI.RangoMin
0003          RangoMax    :="sAnalogicaEscalado".cI.RangoMax
0004          LimSuperior :="sAnalogicaEscalado".cI.LimiteSup
0005          LimInferior :="sAnalogicaEscalado".cI.LimiteInf
0006          sAnalogica  :="sAnalogicas".cI
0007          sControl    :="sAnalogicaEscalado".cI.sControl["VariablesHMI".nPantalla]
0008
```

Segmento 2: Escalado y normalizado de salida analógica cD (caudal bomba derecha).

```
0001       CALL  "sAnalogica"
0002          RangoMin    :="sAnalogicaEscalado".cD.RangoMin
0003          RangoMax    :="sAnalogicaEscalado".cD.RangoMax
0004          LimSuperior :="sAnalogicaEscalado".cD.LimiteSup
0005          LimInferior :="sAnalogicaEscalado".cD.LimiteInf
0006          sAnalogica  :="sAnalogicas".cD
0007          sControl    :="sAnalogicaEscalado".cD.sControl["VariablesHMI".nPantalla]
0008
```

Segmento 3: Escalado y normalizado de salida analógica yI (válvula izquierda).

```
0001       CALL  "sAnalogica"
0002          RangoMin    :="sAnalogicaEscalado".yI.RangoMin
0003          RangoMax    :="sAnalogicaEscalado".yI.RangoMax
0004          LimSuperior :="sAnalogicaEscalado".yI.LimiteSup
0005          LimInferior :="sAnalogicaEscalado".yI.LimiteInf
0006          sAnalogica  :="sAnalogicas".yI
0007          sControl    :="sAnalogicaEscalado".yI.sControl["VariablesHMI".nPantalla]
0008
```

Segmento 4: Escalado y normalizado de salida analógica yD (válvula derecha).

```
0001       CALL  "sAnalogica"
0002          RangoMin    :="sAnalogicaEscalado".yD.RangoMin
0003          RangoMax    :="sAnalogicaEscalado".yD.RangoMax
0004          LimSuperior :="sAnalogicaEscalado".yD.LimiteSup
0005          LimInferior :="sAnalogicaEscalado".yD.LimiteInf
0006          sAnalogica  :="sAnalogicas".yD
0007          sControl    :="sAnalogicaEscalado".yD.sControl["VariablesHMI".nPantalla]
0008
```

4Tanques / PLC [CPU 1516-3 PN/DP] / Bloques de programa / 03_PROCEDIMIENTOS

marchaParo [FC310]

marchaParo Propiedades							
General							
Nombre	marchaParo	**Número**	310	**Tipo**	FC	**Idioma**	AWL
Numeración	Manual						
Información							
Título	Agrupación de funciones de puesta en marcha y paro de actuadores.	**Autor**	Alex Espinal	**Comentario**		**Familia**	
Versión	0.1	**ID personaliza-do**					

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

Segmento 1: Marcha paro de bI.

```
0001
0002       CALL  "Actuador"
0003          eMarcha  :="VariablesHMI".Marcha["VariablesHMI".nPantalla]
0004          eParo    :="VariablesHMI".Paro["VariablesHMI".nPantalla]
0005          Actuador :="sDigitales".bI
0006
```

Segmento 2: Marcha paro de bD.

```
0001
0002       CALL  "Actuador"
0003          eMarcha  :="VariablesHMI".Marcha["VariablesHMI".nPantalla]
0004          eParo    :="VariablesHMI".Paro["VariablesHMI".nPantalla]
0005          Actuador :="sDigitales".bD
0006
```

Segmento 3: Marcha paro del motor del compresor de aire.

```
0001
0002       CALL  "Actuador"
0003          eMarcha  :="VariablesHMI".Marcha["VariablesHMI".nPantalla]
0004          eParo    :="VariablesHMI".Paro["VariablesHMI".nPantalla]
0005          Actuador :="sDigitales".Compresor
0006
```

Segmento 4: Habilitación de PI bomba izquierda.

```
0001       CALL  "Actuador"
0002          eMarcha  :="VariablesHMI".Marcha["VariablesHMI".nPantalla]
0003          eParo    :="VariablesHMI".Paro["VariablesHMI".nPantalla]
0004          Actuador :="PI_Modo2".PIBombaI.MarchaPI["VariablesHMI".nPantalla]
0005
0006
```

Segmento 5: Habilitación de PI bomba derecha.

```
0001       CALL  "Actuador"
0002          eMarcha  :="VariablesHMI".Marcha["VariablesHMI".nPantalla]
0003          eParo    :="VariablesHMI".Paro["VariablesHMI".nPantalla]
0004          Actuador :="PI_Modo2".PIBombaD.MarchaPI["VariablesHMI".nPantalla]
0005
0006
```

Segmento 6: Marcha paro de Y1.

```
0001       A     "VariablesHMI".MarchaY[1]
0002       =     "sDigitales".Y1
0003
```

Segmento 7: Marcha paro de Y2.

```
0001        A       "VariablesHMI".MarchaY[2]
0002        =       "sDigitales".Y2
0003
```

Segmento 8: Marcha paro de Y3.

```
0001        A       "VariablesHMI".MarchaY[3]
0002        =       "sDigitales".Y3
0003
```

Segmento 9: Marcha paro de Y4.

```
0001        A       "VariablesHMI".MarchaY[4]
0002        =       "sDigitales".Y4
0003
```

4Tanques / PLC [CPU 1516-3 PN/DP] / Bloques de programa / 03_PROCEDIMIENTOS

ejesXs [FC311]

ejesXs Propiedades							
General							
Nombre	ejesXs	**Número**	311	**Tipo**	FC	**Idioma**	AWL
Numeración	Manual						
Información							
Título	Generación del eje x.	**Autor**	Alex Espinal	**Comentario**		**Familia**	
Versión	0.1	**ID personalizado**					

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

Segmento 1: Generación del eje x para el graficado.

```
0001
0002       CALL  "ejeX", "ejeX_DB"
0003          habilitar :="VariablesHMI".Marcha["VariablesHMI".nPantalla]
0004          TiempoOn  :=100
0005          TiempoOFF :=100
0006          dt        :=0.1
0007          Reset     :="VariablesHMI".Reiniciar["VariablesHMI".nPantalla]
0008          tiempo    :="VariablesHMI".Tiempo["VariablesHMI".nPantalla]
0009
```

4Tanques / PLC [CPU 1516-3 PN/DP] / Bloques de programa / 03_PROCEDIMIENTOS

CerrarRT [FC312]

CerrarRT Propiedades							
General							
Nombre	CerrarRT	**Número**	312	**Tipo**	FC	**Idioma**	SCL
Numeración	Manual						
Información							
Título		**Autor**	Alex Espinal	**Comentario**		**Familia**	
Versión	0.1	**ID personalizado**					

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

```
0001 //En esta sección ponemos el sistema en condiciones iniciales tras activarse VariablesHMI".Cerrar.
0002 //La misma cambia de estado cuando de cierra el sistema SCADA.
0003 IF "VariablesHMI".Cerrar = TRUE THEN
0004   // Statement section IF
0005   "VariablesHMI".Paro[1] := TRUE;
0006   "VariablesHMI".Paro[2] := TRUE;
0007   "VariablesHMI".Reiniciar[1] := TRUE;
0008   "VariablesHMI".Reiniciar[2] := TRUE;
0009   "VariablesHMI".RegistrarModo[1] := FALSE;
0010   "VariablesHMI".RegistrarModo[2] := FALSE;
0011   "sAnalogicaEscalado".cI.sControl[1] := 0.0;
0012   "sAnalogicaEscalado".cD.sControl[1] := 0.0;
0013   "sAnalogicaEscalado".yI.sControl[1] := 0.0;
0014   "sAnalogicaEscalado".yD.sControl[1] := 0.0;
0015   "sAnalogicaEscalado".cI.sControl[2] := 0.0;
0016   "sAnalogicaEscalado".cD.sControl[2] := 0.0;
0017   "sAnalogicaEscalado".yI.sControl[2] := 0.0;
0018   "sAnalogicaEscalado".yD.sControl[2] := 0.0;
0019   "PI_Modo2".PIBombaI.Sp := 0.0;
0020   "PI_Modo2".PIBombaI.Kp := 0.0;
0021   "PI_Modo2".PIBombaI.Ti := 9999.0;
0022   "PI_Modo2".PIBombaI.I := 0.0;
0023   "PI_Modo2".PIBombaD.Sp := 0.0;
0024   "PI_Modo2".PIBombaD.Kp := 0.0;
0025   "PI_Modo2".PIBombaD.Ti := 9999.0;
0026   "PI_Modo2".PIBombaD.I := 0.0;
0027   "VariablesHMI".nPantalla := 1;
0028 ELSE
0029   RETURN;
0030 END_IF;
0031
```

Símbolo	Dirección	Tipo	Comentario
"PI_Modo2".PIBombaD.I		Real	Variable que acumula el valor de la integral.
"PI_Modo2".PIBombaD.Kp		Real	Parámetro que almacena la ganancia proporcional.
"PI_Modo2".PIBombaD.Sp		Real	Parámetro que almacena la consigna o referencia deseada.
"PI_Modo2".PIBombaD.Ti		Real	Parámetro que almacena el tiempo integral.
"PI_Modo2".PIBombaI.I		Real	Variable que acumula el valor de la integral.
"PI_Modo2".PIBombaI.Kp		Real	Parámetro que almacena la ganancia proporcional.
"PI_Modo2".PIBombaI.Sp		Real	Parámetro que almacena la consigna o referencia deseada.
"PI_Modo2".PIBombaI.Ti		Real	Parámetro que almacena el tiempo integral.
"sAnalogicaEscalado".cD.sControl[1]		Real	Arreglo de la señal de control.
"sAnalogicaEscalado".cD.sControl[2]		Real	Arreglo de la señal de control.
"sAnalogicaEscalado".cI.sControl[1]		Real	Arreglo de la señal de control.
"sAnalogicaEscalado".cI.sControl[2]		Real	Arreglo de la señal de control.
"sAnalogicaEscalado".yD.sControl[1]		Real	Arreglo de la señal de control.
"sAnalogicaEscalado".yD.sControl[2]		Real	Arreglo de la señal de control.
"sAnalogicaEscalado".yI.sControl[1]		Real	Arreglo de la señal de control.
"sAnalogicaEscalado".yI.sControl[2]		Real	Arreglo de la señal de control.
"VariablesHMI".Cerrar		Bool	Variable booleana para poner en condiciones iniciales la planta tras cerrar el sistema SCADA.
"VariablesHMI".nPantalla		Int	Variable que almacena el número de pantalla del sistema SCADA.
"VariablesHMI".Paro[1]		Bool	Arreglo para poner la planta en paro desde distintas pantallas.
"VariablesHMI".Paro[2]		Bool	Arreglo para poner la planta en paro desde distintas pantallas.
"VariablesHMI".RegistrarModo[1]		Bool	Arreglo para poner en marcha la grabación de datos desde distintas pantallas.
"VariablesHMI".RegistrarModo[2]		Bool	Arreglo para poner en marcha la grabación de datos desde distintas pantallas.
"VariablesHMI".Reiniciar[1]		Bool	Arreglo para poner la planta en condiciones iniciales desde distintas pantallas.
"VariablesHMI".Reiniciar[2]		Bool	Arreglo para poner la planta en condiciones iniciales desde distintas pantallas.

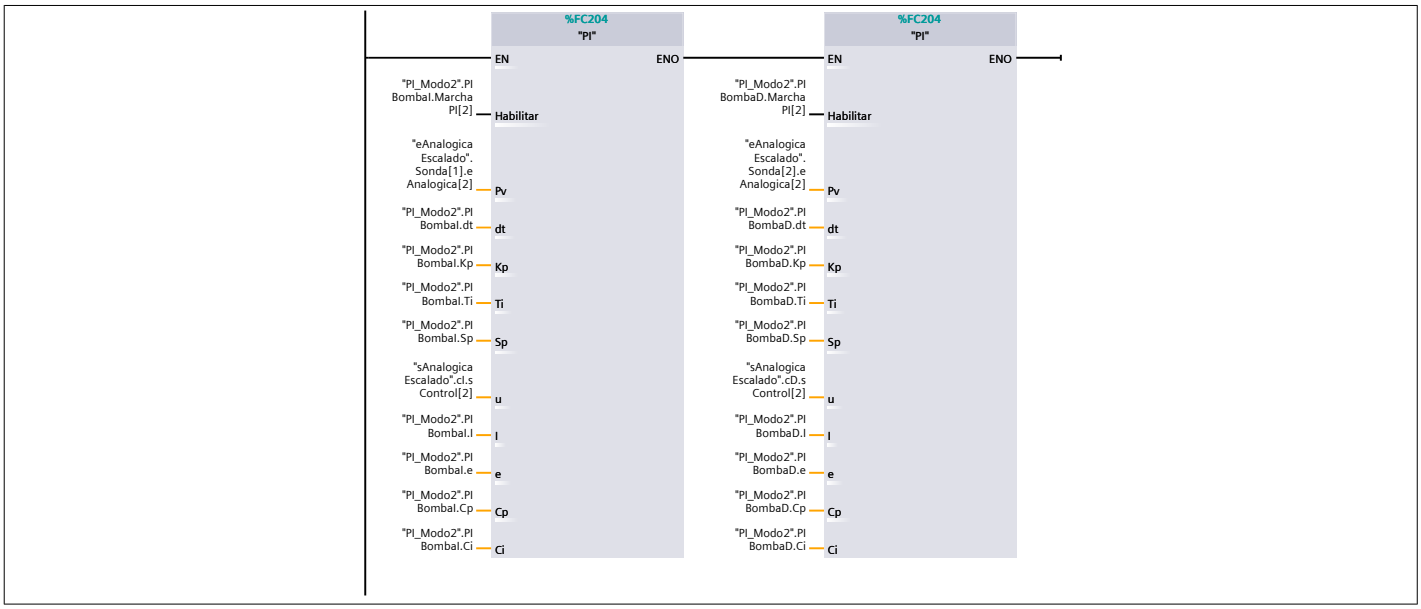
4Tanques / PLC [CPU 1516-3 PN/DP] / Bloques de programa

ControlDescentralizado [OB30]

ControlDescentralizado Propiedades							
General							
Nombre	ControlDescentralizado	**Número**	30	**Tipo**	OB	**Idioma**	KOP
Numeración	Automático						
Información							
Título	Controlador descentraliza-do.	**Autor**	Alex Espinal	**Comentario**		**Familia**	
Versión	0.1	**ID personaliza-do**					

ControlDescentralizado			
Nombre	**Tipo de datos**	**Valor predet.**	**Comentario**
▼ Input			
Initial_Call	Bool		Initial call of this OB
Event_Count	Int		Events discarded
Temp			
Constant			

Segmento 1: En este segmento invocamos dos funciones PI que forman el controlador descentralizado.



4Tanques / PLC [CPU 1516-3 PN/DP] / Bloques de programa

ControlManual [OB1]

ControlManual Propiedades							
General							
Nombre	ControlManual	**Número**	1	**Tipo**	OB	**Idioma**	KOP
Numeración	Automático						
Información							
Título	"Main Program Sweep (Cycle)"	**Autor**	Alex Espinal	**Comentario**		**Familia**	
Versión	0.1	**ID personalizado**					

ControlManual			
Nombre	**Tipo de datos**	**Valor predet.**	**Comentario**
▼ Input			
Initial_Call	Bool		
Remanence	Bool		
Temp			
Constant			

Segmento 1: Invocamos el procedimiento Entradas.

```
0001
0002        CALL  "Entradas"
0003
```

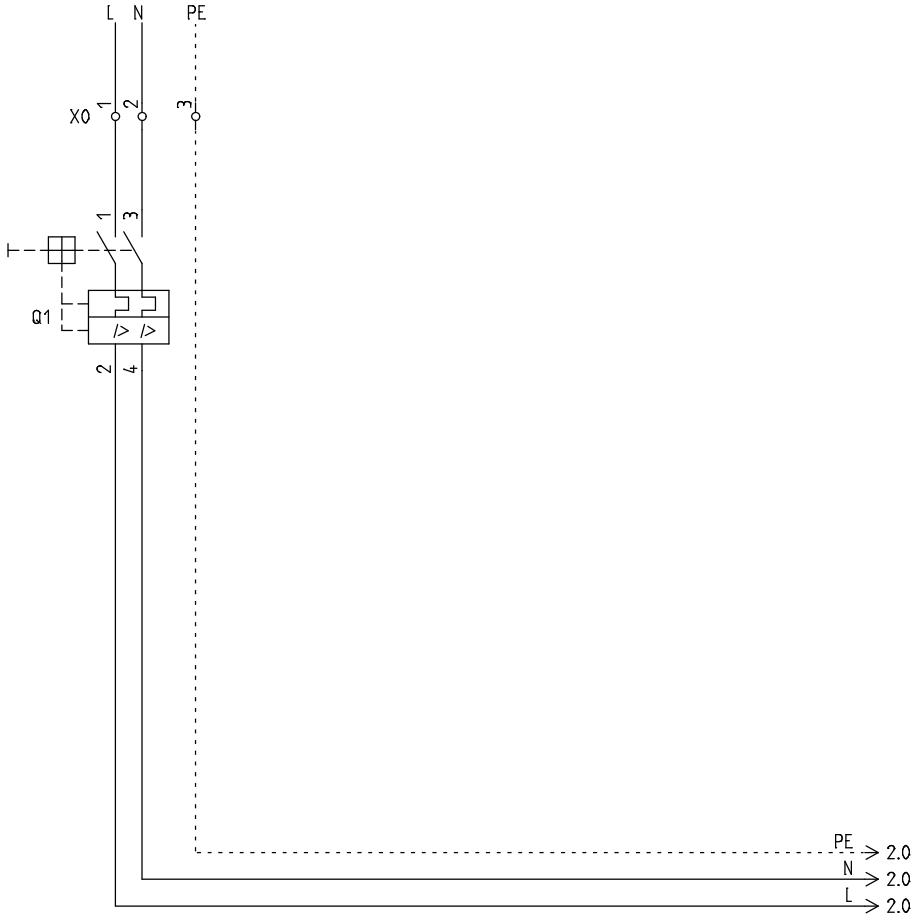
Segmento 2: Invocamos el procedimiento Procesos.

```
0001
0002        CALL  "Procesos"
0003
```

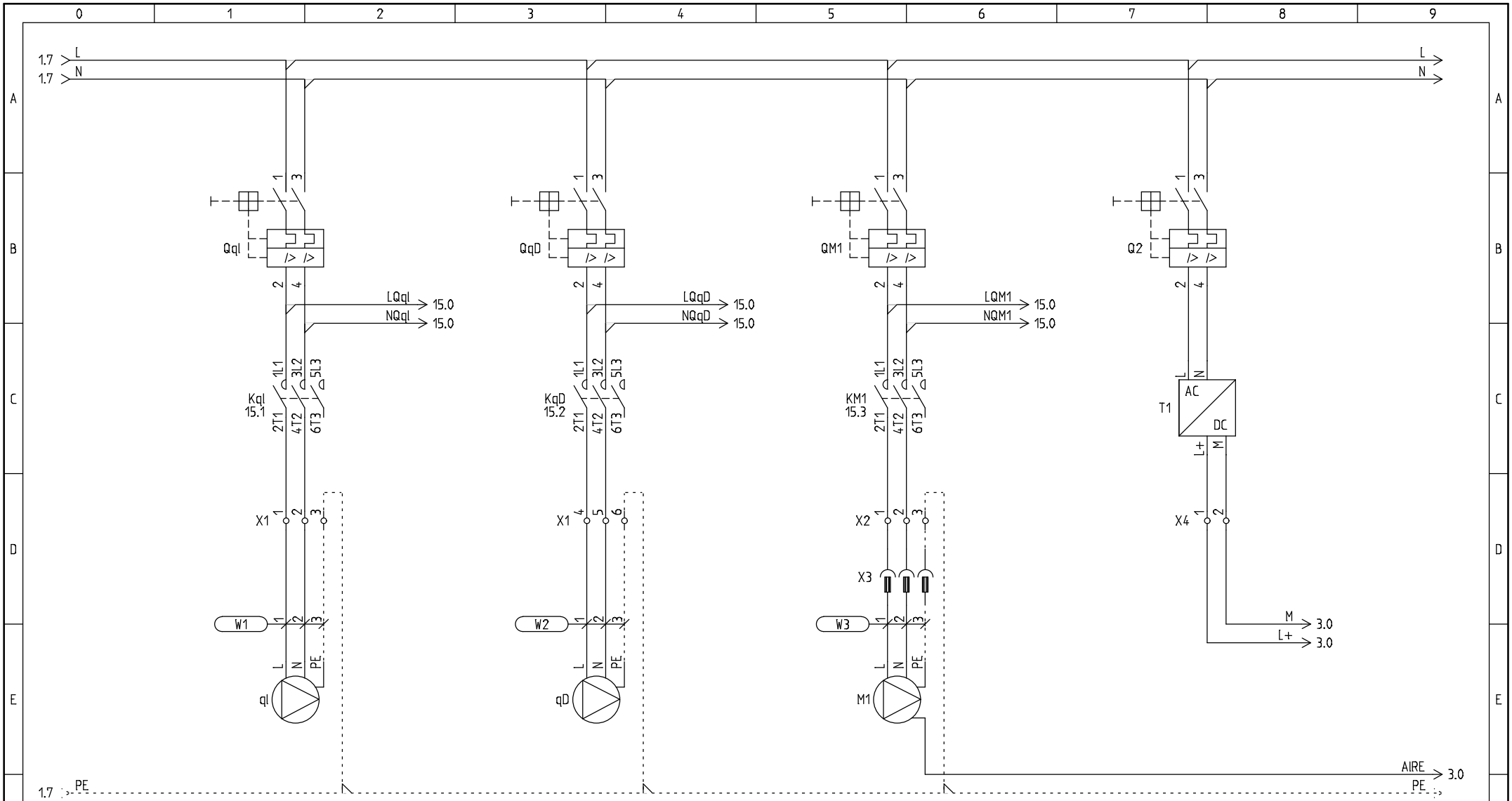
Segmento 3: Invocamos el procedimiento Salidas.

```
0001
0002        CALL  "Salidas"
0003
```

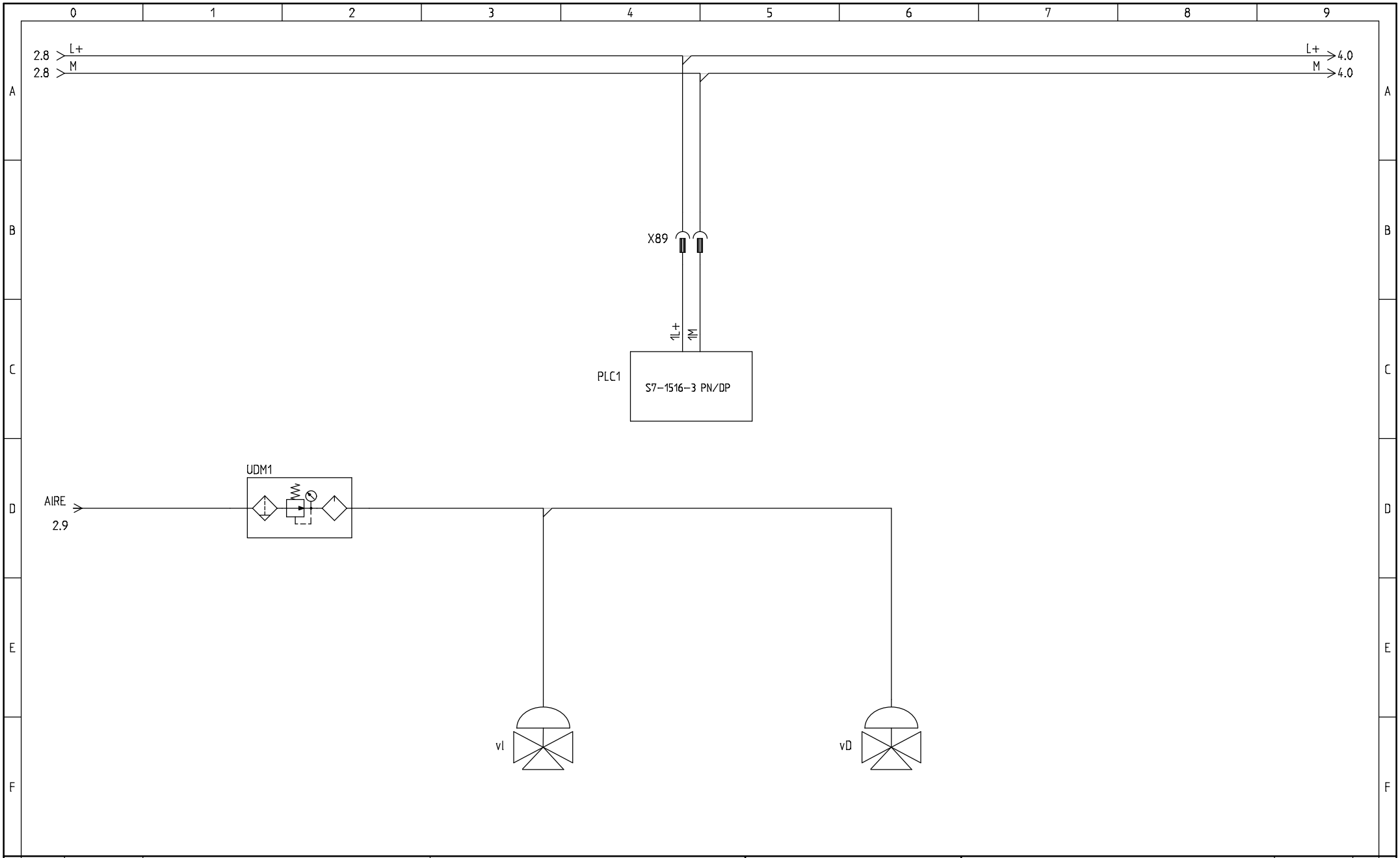
Esquemas eléctricos



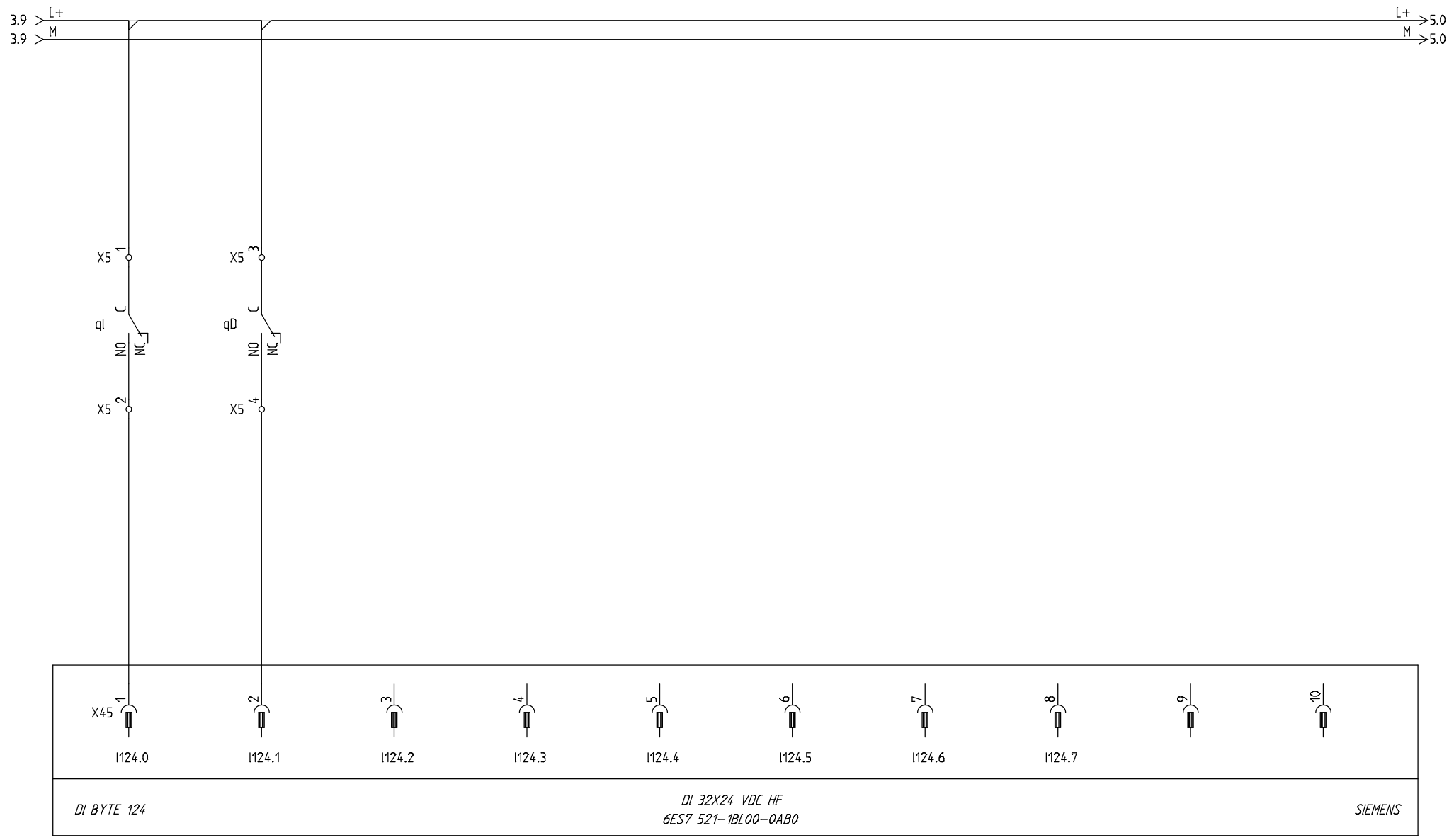
Fecha:	10/10/2022	Dibujado por: ALEX ESPINAL	Proyecto: TRABAJO FIN DE MASTER	Titulo Esquema: LINEA DE ALIMENTACION	UNED / UNIVERSIDAD COMPLUTENSE MADRID	Pagina	1
Curso:	2	Comprobado por: J. SANCHEZ Y S. GONZALEZ				Total Pag.	15



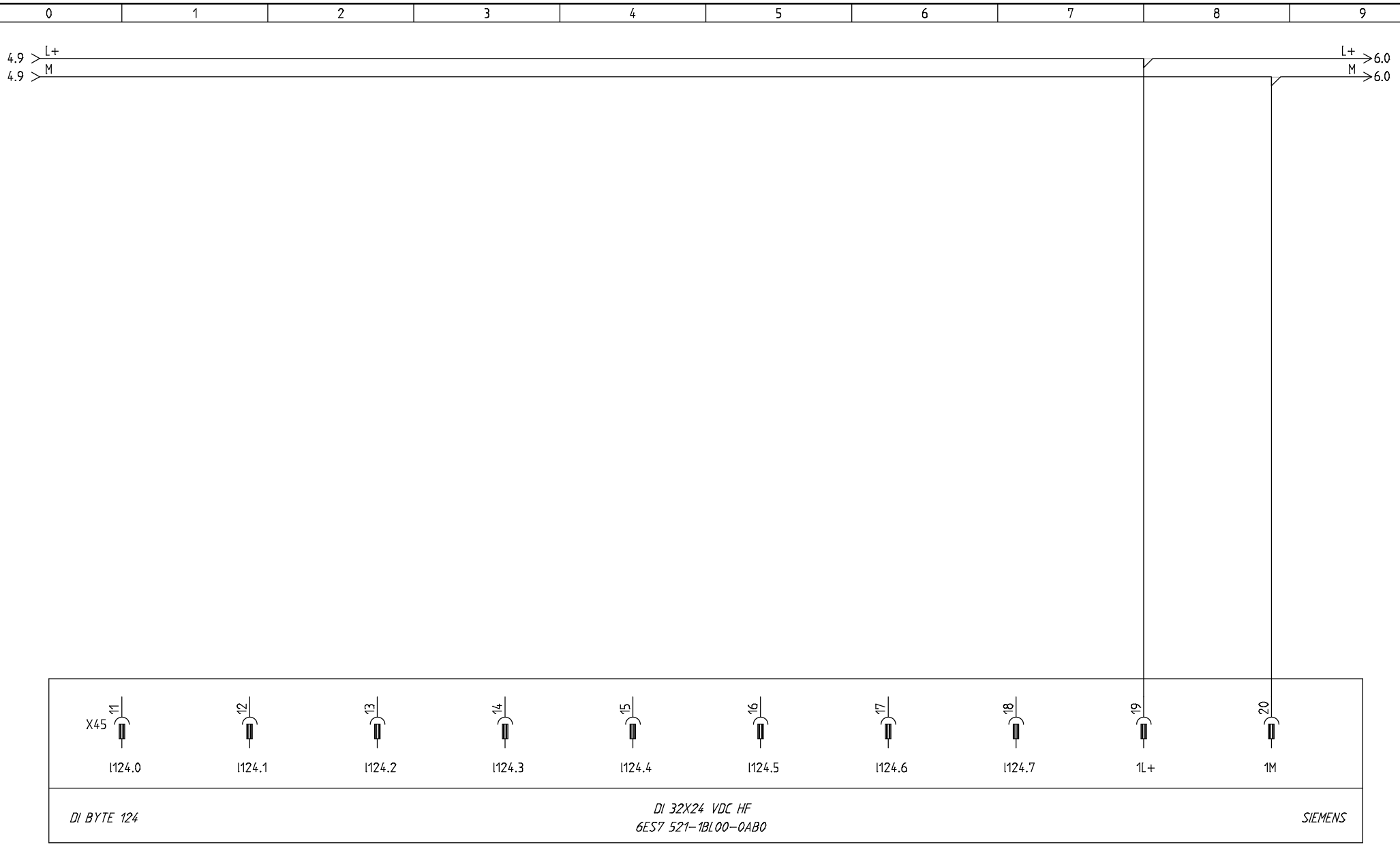
Fecha:	10/10/2022	Dibujado por: ALEX ESPINAL	Proyecto: TRABAJO FIN DE MASTER	Titulo Esquema: ESQUEMA DE POTENCIA	UNED / UNIVERSIDAD COMPLUTENSE MADRID	Pagina	2
Curso:	2	Comprobado por: J. SANCHEZ Y S. GONZALEZ				Total Pag.	15



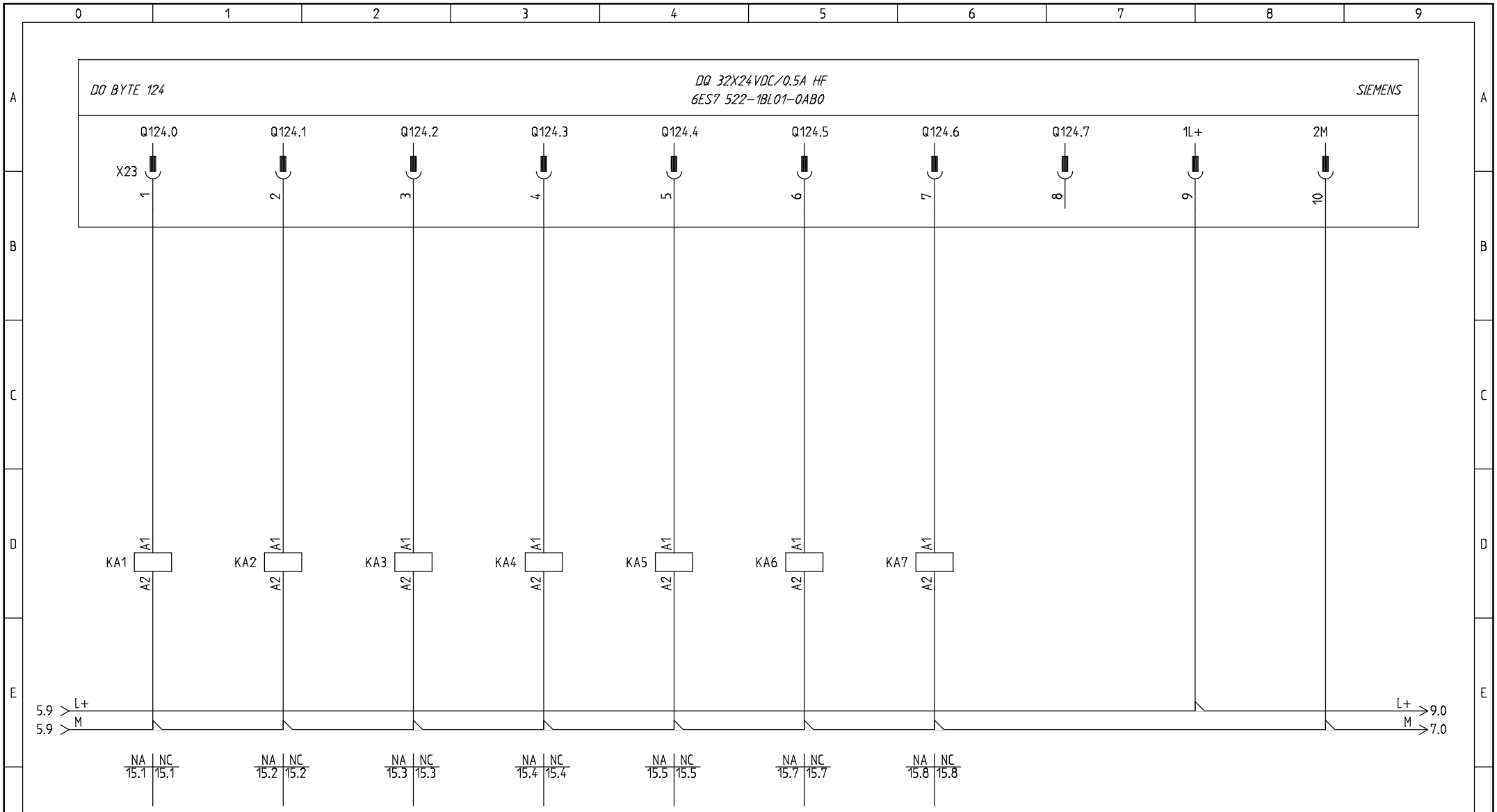
Fecha:	10/10/2022	Dibujado por: ALEX ESPINAL	Proyecto: TRABAJO FIN DE MASTER	Titulo Esquema: ALIMENTACION PLC Y VALVULAS	UNED / UNIVERSIDAD COMPLUTENSE MADRID	Pagina	3
Curso:	2	Comprobado por: J. SANCHEZ Y S. GONZALEZ				Total Pag.	15



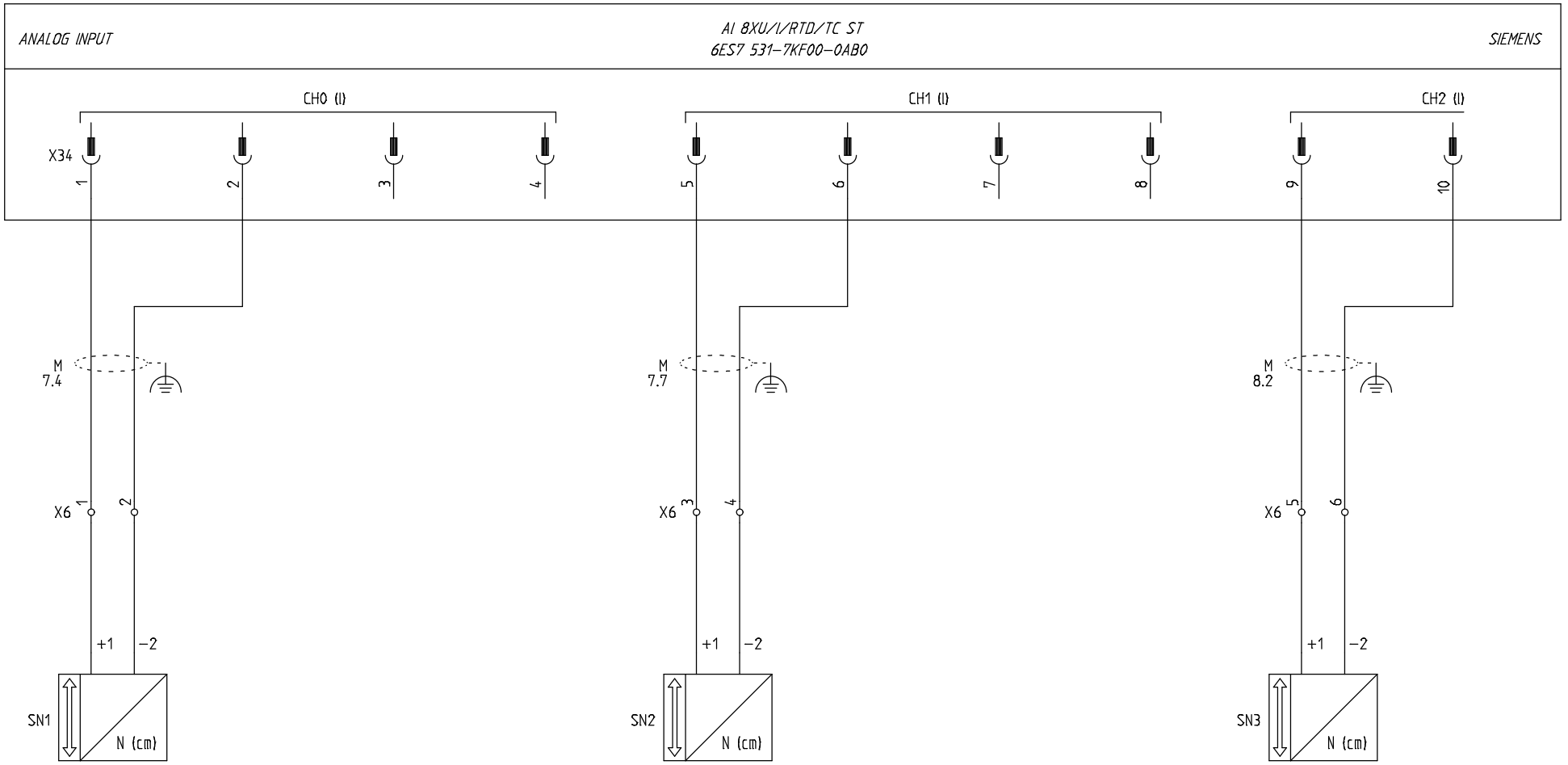
Fecha:	10/10/2022	Dibujado por: ALEX ESPINAL	Proyecto: TRABAJO FIN DE MASTER	Titulo Esquema: ESQUEMA DI BYTE	UNED / UNIVERSIDAD COMPLUTENSE MADRID	Pagina 4
Curso:		Comprobado por: J. SANCHEZ Y S. GONZALEZ				Total Pag. 15



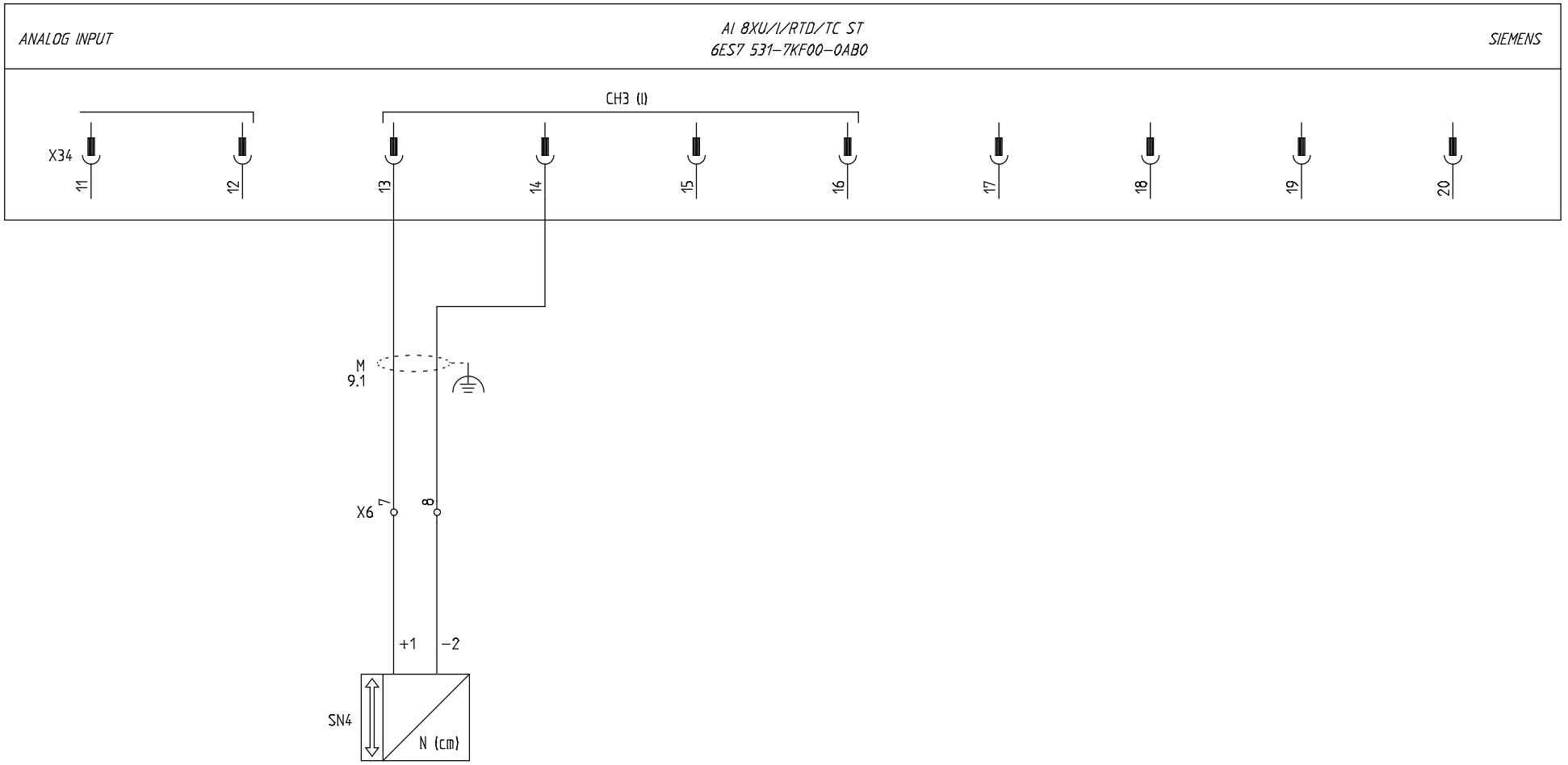
Fecha:	13/10/2022	Dibujado por: ALEX ESPINAL	Proyecto: TRABAJO FIN DE MASTER	Titulo Esquema: ESQUEMA DI BYTE	UNED / UNIVERSIDAD COMPLUTENSE MADRID	Pagina 5
Curso:	2	Comprobado por: J. SANCHEZ Y S. GONZALEZ				Total Pag. 15



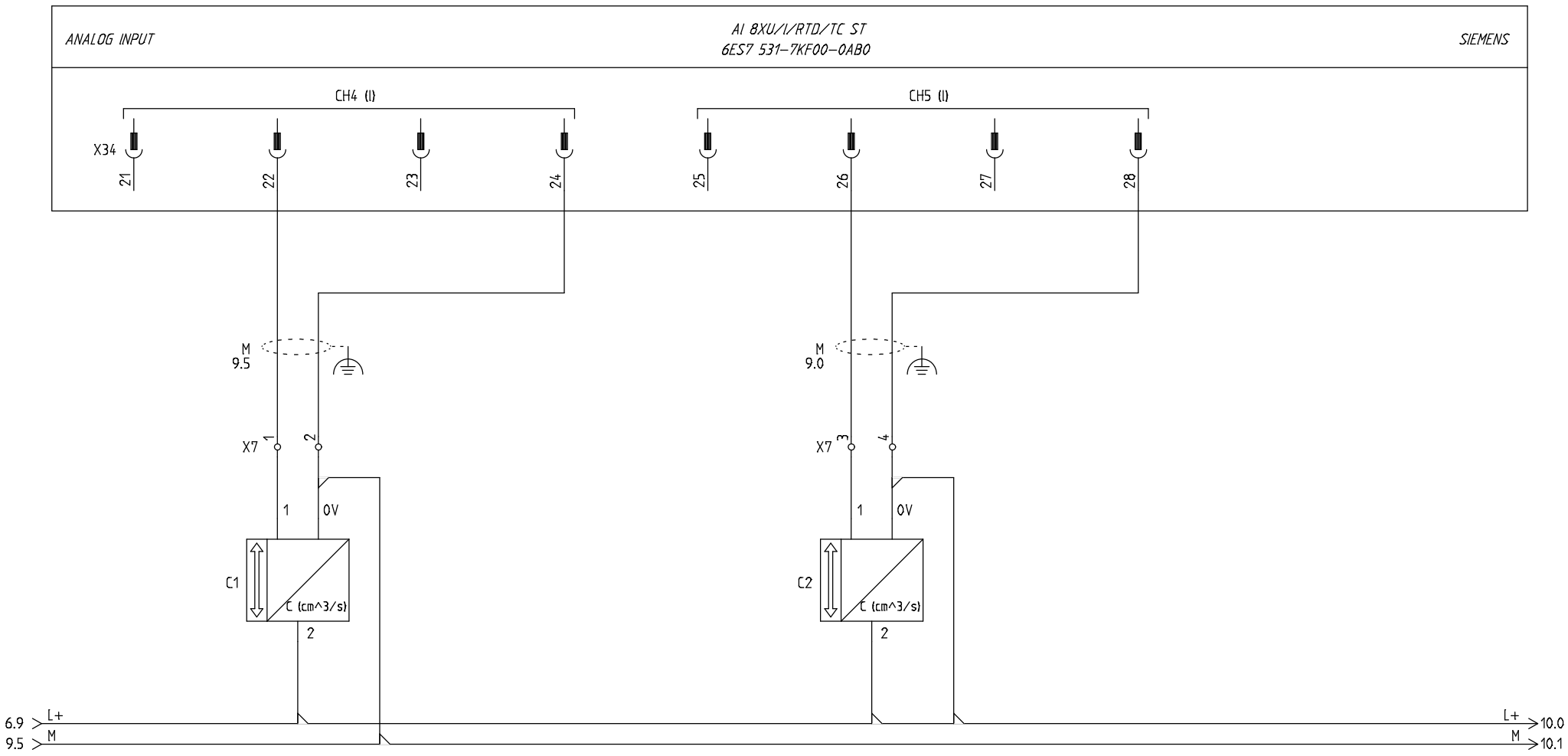
Fecha:	13/10/2022	Dibujado por: ALEX ESPINAL	Proyecto: TRABAJO FIN DE MASTER	Titulo Esquema: ESQUEMA DO BYTE	UNED / UNIVERSIDAD COMPLUTENSE MADRID	Pagina 6
Curso:	2	Comprobado por: J. SANCHEZ Y S. GONZALEZ				Total Pag. 15



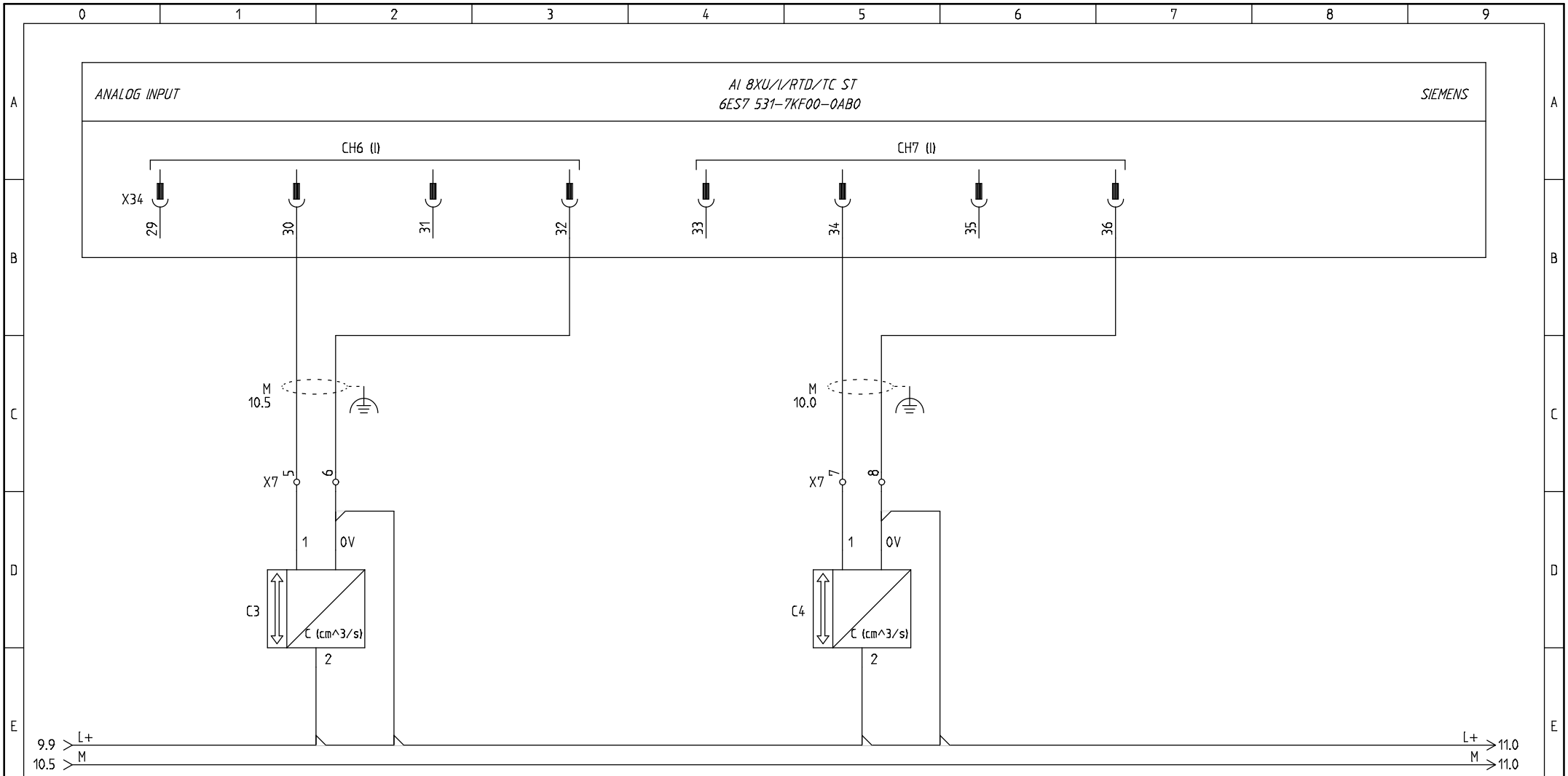
Fecha:	13/10/2022	Dibujado por: ALEX ESPINAL	Proyecto: TRABAJO FIN DE MASTER	Titulo Esquema: ESQUEMA AI	UNED / UNIVERSIDAD COMPLUTENSE MADRID	Pagina	7
Curso:	2	Comprobado por: J. SANCHEZ Y S. GONZALEZ				Total Pag.	15



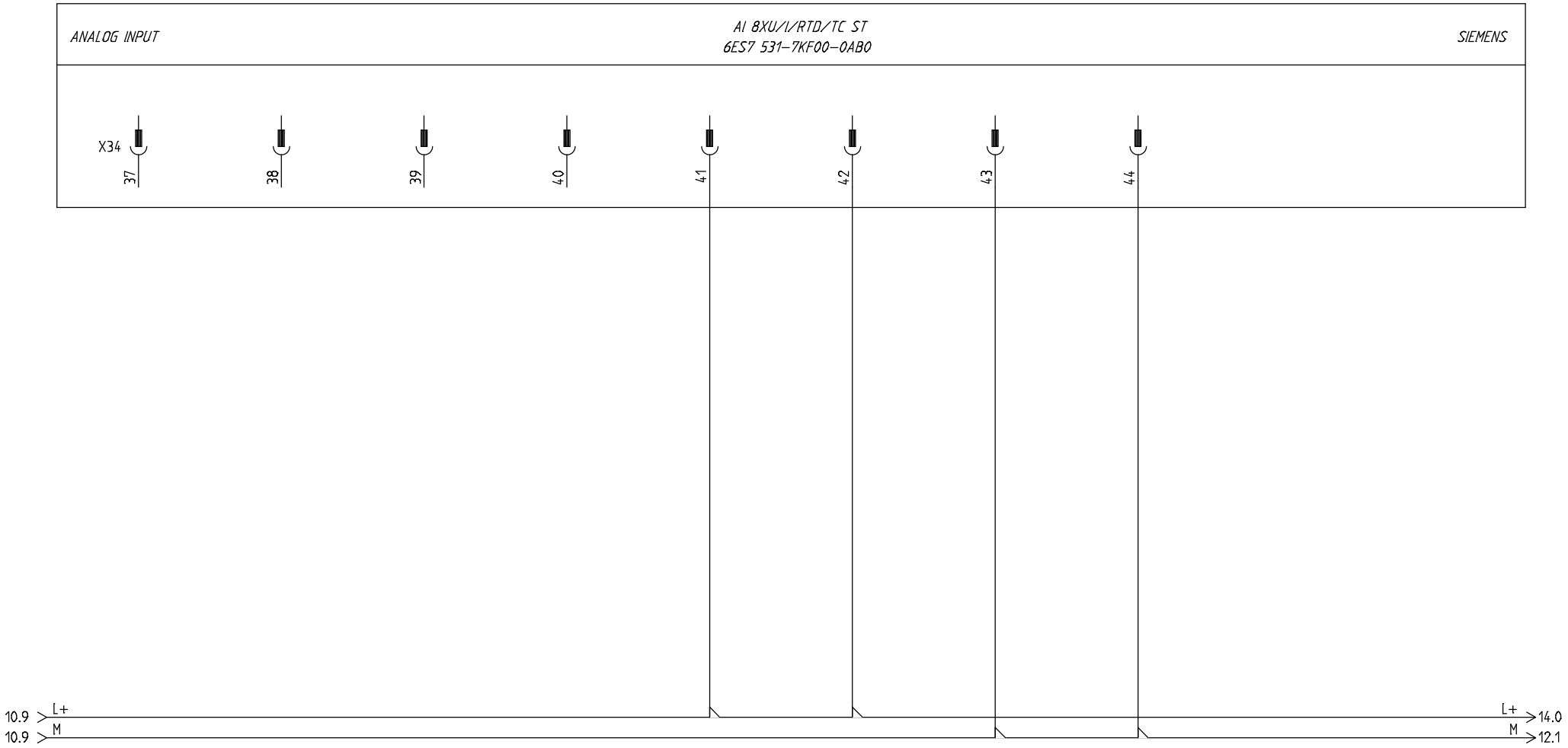
Fecha:	13/10/2022	Dibujado por: ALEX ESPINAL	Proyecto: TRABAJO FIN DE MASTER	Titulo Esquema: ESQUEMA AI	UNED / UNIVERSIDAD COMPLUTENSE MADRID	Pagina	8
Curso:	2	Comprobado por: J. SANCHEZ Y S. GONZALEZ				Total Pag.	15



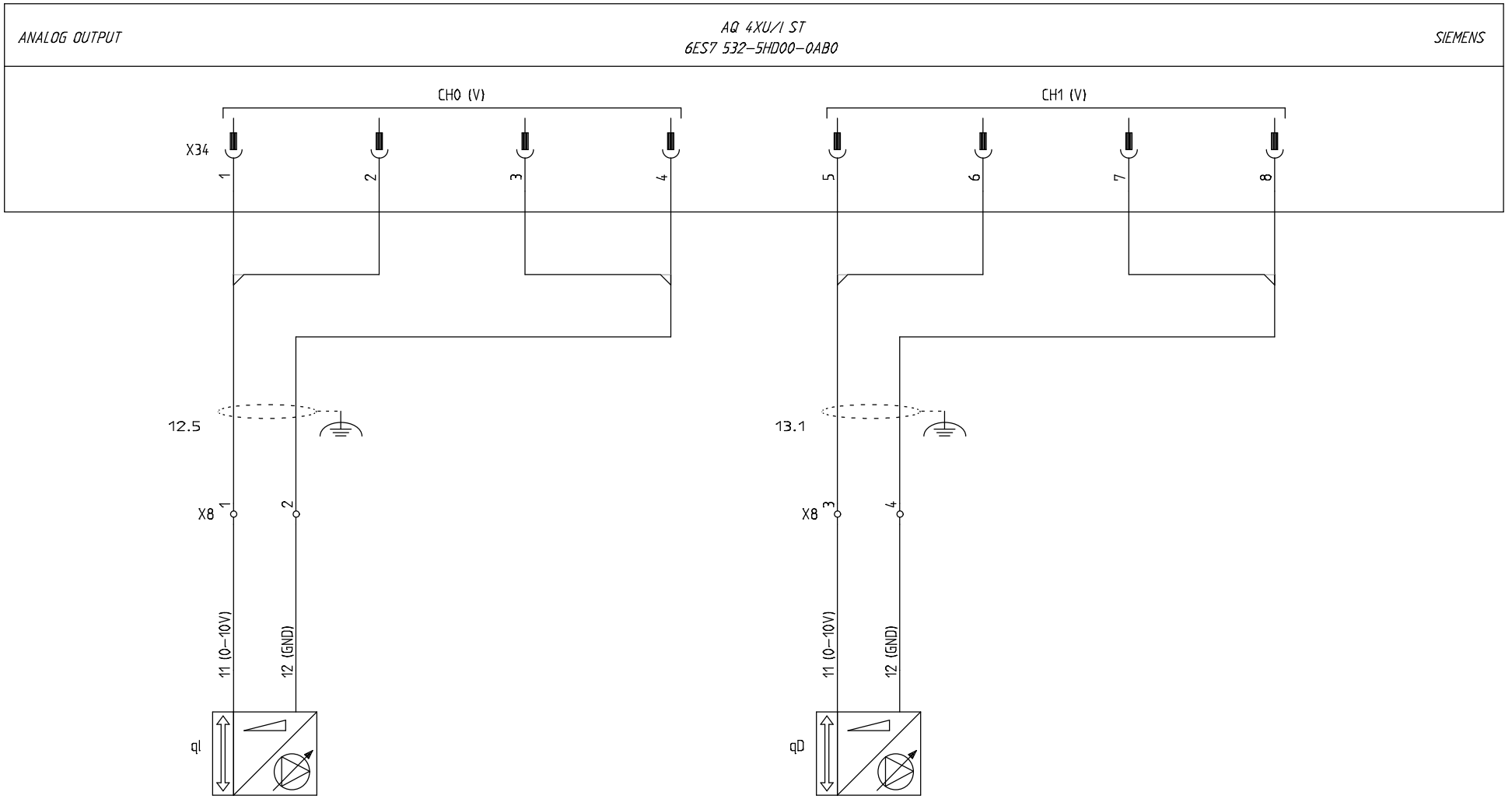
Fecha:	14/10/2022	Dibujado por: ALEX ESPINAL	Proyecto: TRABAJO FIN DE MASTER	Titulo Esquema: ESQUEMA AI	UNED / UNIVERSIDAD COMPLUTENSE MADRID	Pagina	9
Curso:	2	Comprobado por: J. SANCHEZ Y S. GONZALEZ				Total Pag.	15



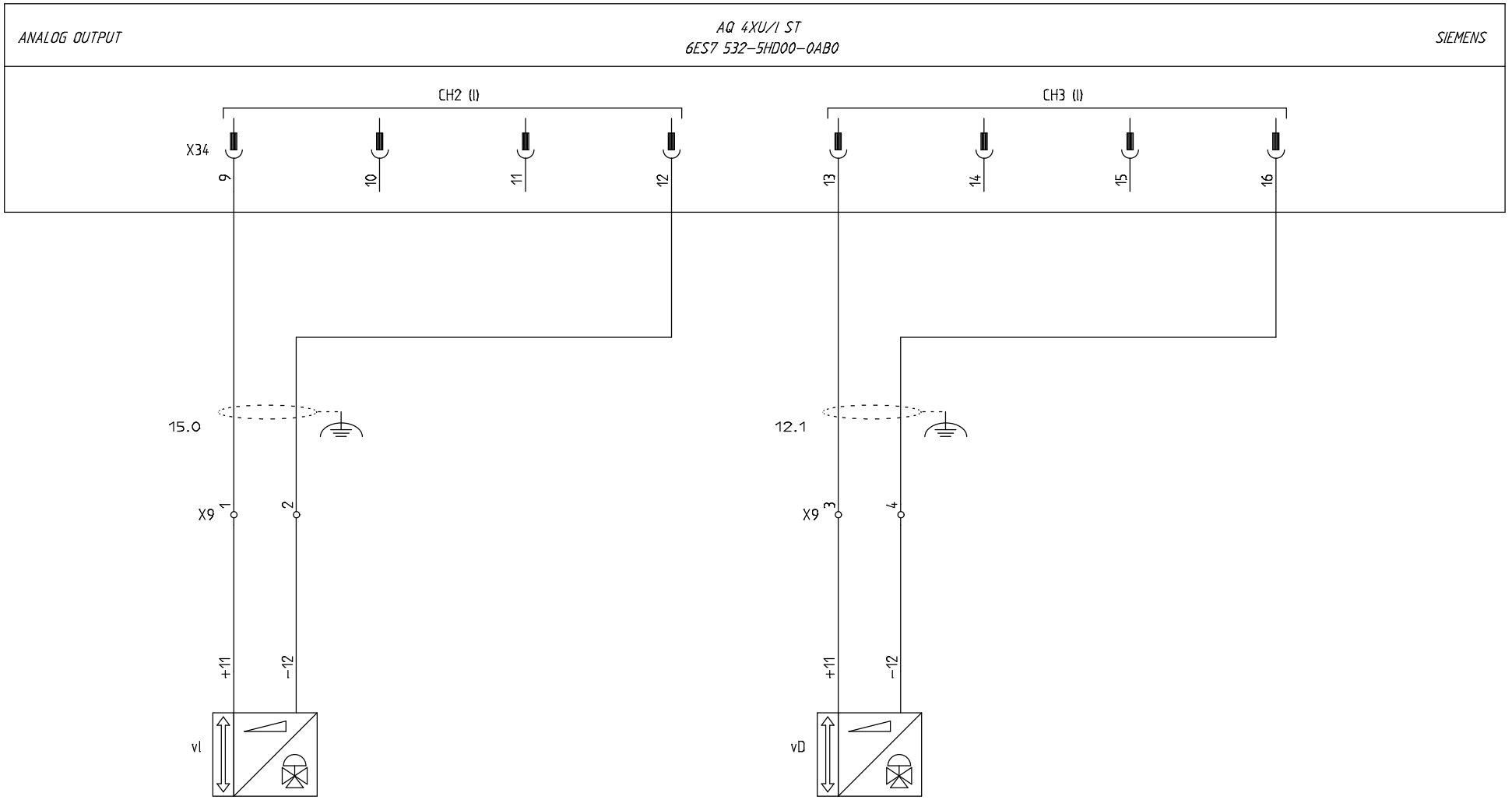
Fecha:	14/10/2022	Dibujado por: ALEX ESPINAL	Proyecto: TRABAJO FIN DE MASTER	Titulo Esquema: ESQUEMA AI	UNED / UNIVERSIDAD COMPLUTENSE MADRID	Pagina	10
Curso:	2	Comprobado por: J. SANCHEZ Y S. GONZALEZ				Total Pag.	15



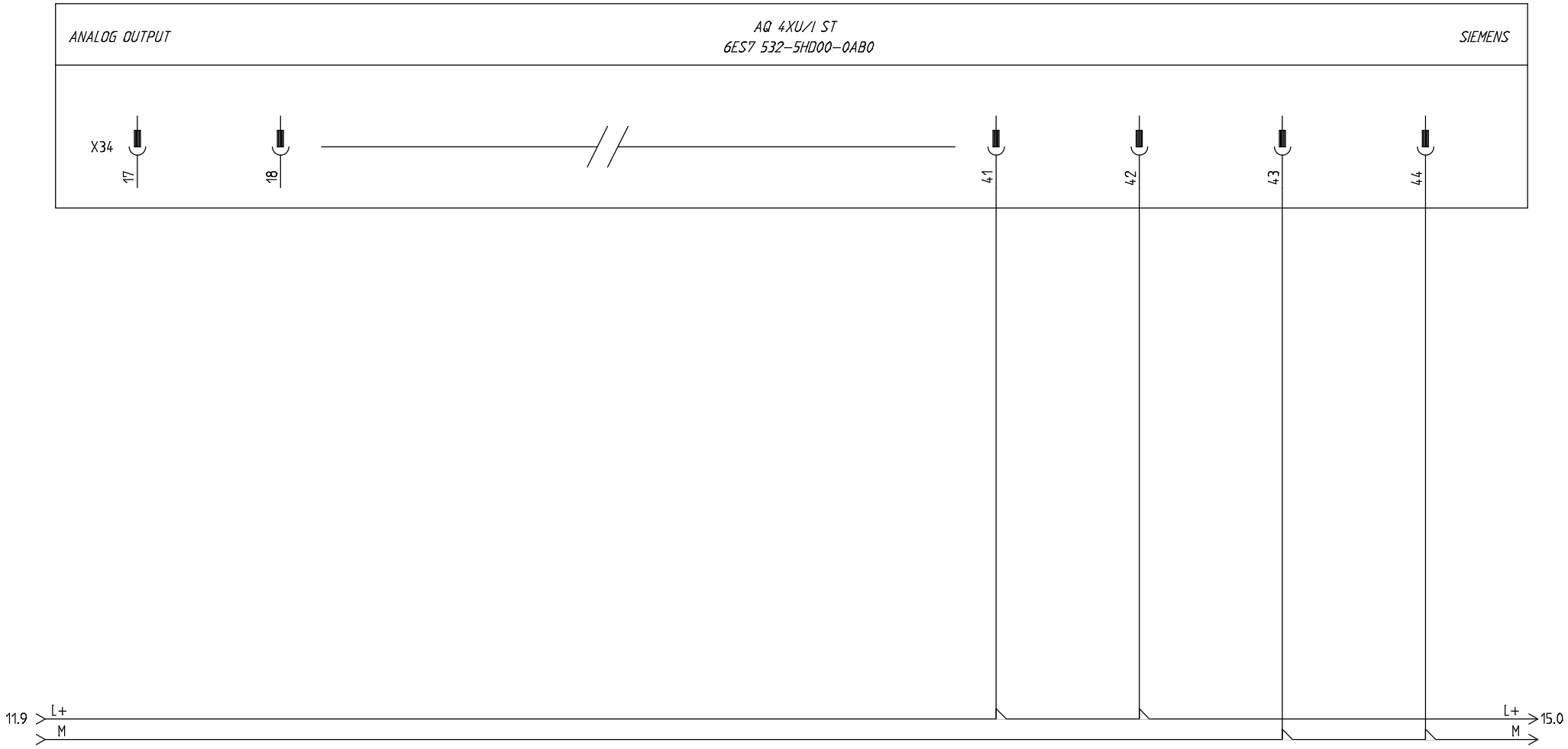
Fecha:	14/10/2022	Dibujado por: ALEX ESPINAL	Proyecto: TRABAJO FIN DE MASTER	Titulo Esquema: ESQUEMA AI	UNED / UNIVERSIDAD COMPLUTENSE MADRID	Pagina	11
Curso:	2	Comprobado por: J. SANCHEZ Y S. GONZALEZ				Total Pag.	15



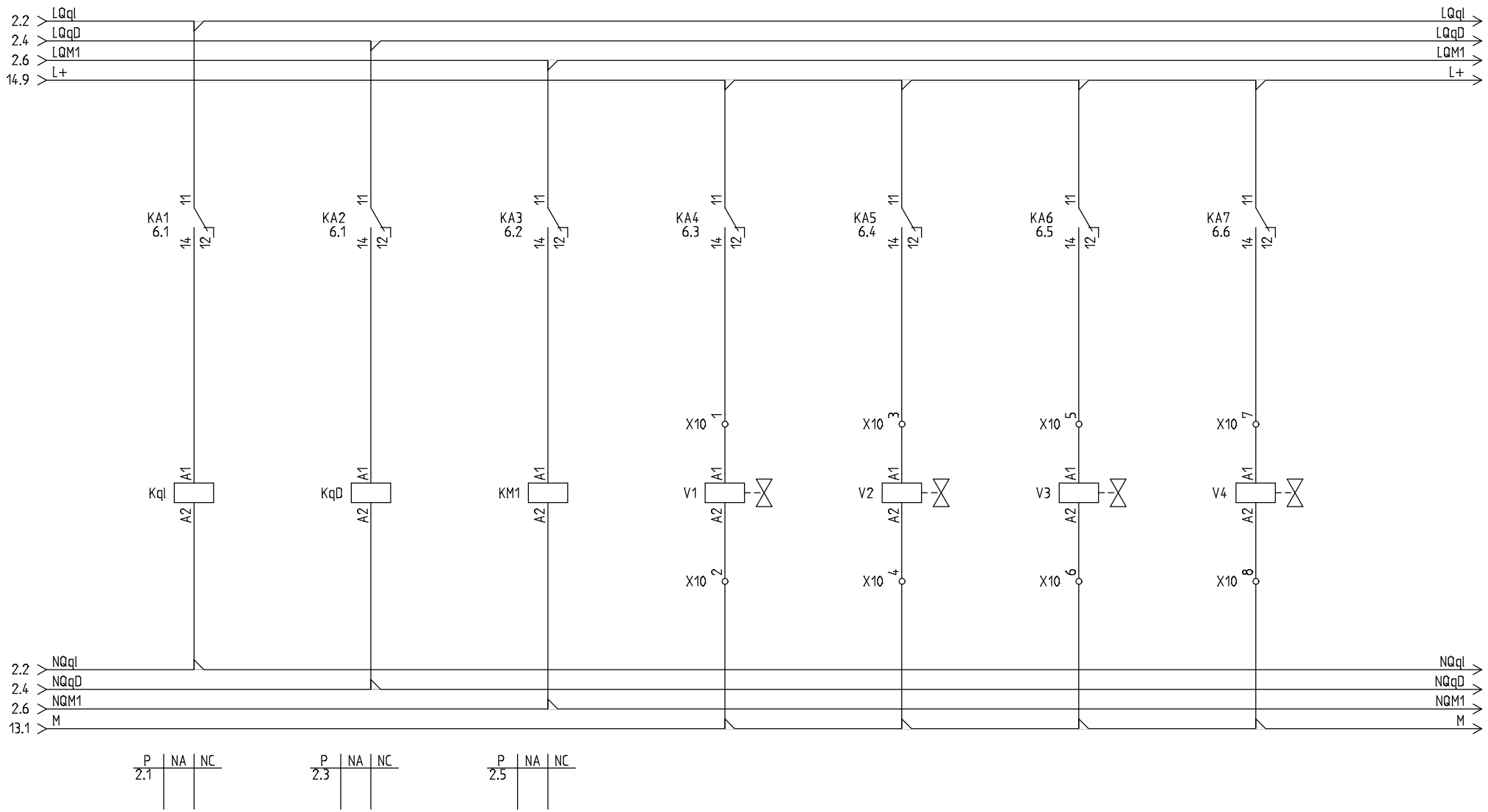
Fecha:	14/10/2022	Dibujado por: ALEX ESPINAL	Proyecto: TRABAJO FIN DE MASTER	Titulo Esquema: ESQUEMA AO	UNED / UNIVERSIDAD COMPLUTENSE MADRID	Pagina 12
Curso:	2	Comprobado por: J. SANCHEZ Y S. GONZALEZ				Total Pag. 15



Fecha:	14/10/2022	Dibujado por: ALEX ESPINAL	Proyecto: TRABAJO FIN DE MASTER	Titulo Esquema: ESQUEMA AO	UNED / UNIVERSIDAD COMPLUTENSE MADRID	Pagina 13
Curso:	2	Comprobado por: J. SANCHEZ Y S. GONZALEZ				Total Pag. 15



Fecha:	14/10/2022	Dibujado por: ALEX ESPINAL	Proyecto: TRABAJO FIN DE MASTER	Titulo Esquema: ESQUEMA AO	UNED / UNIVERSIDAD COMPLUTENSE MADRID	Pagina	14
Curso:		Comprobado por: J. SANCHEZ Y S. GONZALEZ				Total Pag.	15



Fecha:	15/01/2023	Dibujado por: ALEX ESPINAL	Proyecto: TRABAJO FIN DE MASTER	Titulo Esquema: ACTIVACION DE ACTUADORES	UNED / UNIVERSIDAD COMPLUTENSE MADRID	Pagina	15
Curso:	2	Comprobado por: J. SANCHEZ Y S. GONZALEZ				Total Pag.	15