



Universitat
Autònoma
de Barcelona



Diseño e implantación de un sistema SCADA para una planta de producción y envasado de líquidos

Memòria del projecte d'Enginyeria
en Informàtica realitzat per
Manel Redondo Sol
i dirigit per
Romualdo Moreno Ortiz
Bellaterra, 16 de juny de 2008

El sotesignat,

Professor/a de l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de la UAB,

CERTIFICA:

Que el treball a què correspon aquesta memòria ha estat realitzat sota la seva
direcció per en Manel Redondo Sol

I per tal que consti firma la present.

Signat:

Bellaterra,de.....de 200.....

ÍNDICE

Índice.....	3
1. INTRODUCCIÓN	6
1.1. MOTIVACIÓN Y ALCANCE DEL PROYECTO.....	6
1.2. OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	7
1.3. ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA	8
2. FUNDAMENTOS	10
2.1. AUTOMATIZACIÓN INTEGRADA	10
2.1.1. MODELOS JERÁRQUICOS	11
2.1.2. MODELOS HETERÁRQUICOS	14
2.2. UNIDADES LOCALES DE CONTROL.....	15
2.2.1. EL PLC EN LA AUTOMATIZACIÓN.....	16
2.2.1.1. FUNCIONES DE UN PLC	16
2.2.1.2. ESTRUCTURA DE UN PLC.....	17
2.2.1.1. REGULADORES INDUSTRIALES	19
2.3. SUPERVISIÓN DE PROCESOS INDUSTRIALES	20
2.3.1. SISTEMAS SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition)	21
2.4. COMUNICACIONES INDUSTRIALES: PROFIBUS	22
2.4.1. ORÍGENES Y EVOLUCIÓN.....	22
2.4.2. DEFINICIÓN Y VARIANTES.....	22
2.5. PROCESOS A AUTOMATIZAR.....	27
2.5.1. PROCESOS BATCH	27
2.5.2. PROCESOS CONTINUOS	28
3. VISIÓN GENERAL DEL SISTEMA SCADA	29
3.1. DESCRIPCIÓN FUNCIONAL	30
3.2. REQUISITOS DE PRODUCCIÓN.....	31
3.3. ESTRUCTURA DEL SISTEMA SCADA	32
4. TECNOLOGÍAS UTILIZADAS	34
4.1. INSTRUMENTACIÓN DE CONTROL	34
4.1.1. INSTRUMENTACIÓN INTELIGENTE	34
4.1.2. UNIDADES DE CONTROL LOCAL.....	35
4.1.2.1. EL PLC UTILIZADO	35
4.1.2.2. EL REGULADOR INDUSTRIAL UTILIZADO	37
4.2. EL SOFTWARE.....	39
4.2.1. SOFTWARE SIMATIC (SIEMENS)	39
4.2.2. SOFTWARE WONDERWARE INTOUCH	40
4.3. COMUNICACIÓN.....	41
4.3.1. NIVEL DE CAMPO	41
4.3.1.1. DESCRIPCIÓN DEL PPO.....	41
4.3.1.2. CONFIGURACIÓN DEL PLC	43
4.3.1.3. CONFIGURACIÓN DE LOS VARIADORES DANFOSS VLT2800	46

4.3.1.4. CABLE UTILIZADO.....	47
4.3.2. NIVEL DE SUPERVISIÓN	48
4.3.2.1. ASPECTOS FÍSICOS	49
4.3.2.1.1. CONECTOR PROFIBUS PARA PLC DE SIEMENS (6es7 972-0bb50-0xa0).....	49
4.4.2.1.2. CABLE PROFIBUS.....	49
4.3.2.1.3. TARJETA CP5611 DE SIEMENS.....	50
4.3.2.2. ASPECTOS SOFTWARE	50
4.3.2.2.1. TECNOLOGÍA OPC (OLE/COM for Process Control).....	51
4.3.2.2.1.1. FUNCIONAMIENTO DEL OPC	52
4.3.2.2.2. CONFIGURACIÓN DEL SOFTWARE	53
4.3.2.2.2.1. PROYECTO STEP7	53
4.3.2.2.2.2. STATION CONFIGURATOR.....	58
4.3.2.2.2.3. OPC SCOUT	60
4.3.2.2.2.4. OPC LINK.....	62
5. DISEÑO E IMPLANTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DE LA PLANTA	66
5.1. INTRODUCCIÓN	66
5.2. ETAPA DE EMBOTELLADO	66
5.2.1. DESCRIPCIÓN FUNCIONAL DE LA ETAPA	66
5.2.1.1. PROCESO BATCH: CICLO DE EMBOTELLADO.....	67
5.2.1.1.1. LLENADO DE LA BOTELLA	68
5.2.1.1.2. ESTABILIZACIÓN DEL LÍQUIDO VERTIDO	70
5.2.1.1.3. GIRO DE LA NORIA	70
5.2.1.2. CAUDAL DE ENTRADA A LOS TANQUES DE EMBOTELLADO	71
5.2.2. CONTROL DE LA ETAPA	73
5.2.2.1. INSTRUMENTACIÓN	73
5.2.2.2. DETERMINACIÓN DEL Kv DE LAS ELECTROVÁLVULAS.....	75
5.2.2.3. SEÑALES DE CONTROL	78
5.2.2.4. PROGRAMA.....	79
5.3. ETAPA DE MEZCLA	80
5.3.1. DESCRIPCIÓN FUNCIONAL DE LA ETAPA	80
5.3.2. CONTROL DE LA ETAPA	81
5.3.2.1. INSTRUMENTACIÓN	81
5.3.2.2. SEÑALES DE CONTROL	83
5.3.2.3. TIPOS DE CONTROL REALIZADOS	84
5.3.2.3.1. CONTROL NIVEL.....	84
5.3.2.3.2. CONTROL RATIO	85
5.3.2.4. TROVIS 6496. CONFIGURACIÓN.....	86
5.3.2.5. PROGRAMA.....	87
5.3.2.5.1. IMPLEMENTACIÓN DEL LAZO DE CONTROL DE NIVEL	87
5.3.2.5.1. IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL RATIO	88
5.4. ETAPA DE EVAPORACIÓN.....	89
5.4.1. DESCRIPCIÓN FUNCIONAL DE LA ETAPA	89
5.4.1.1. CARGA DE LOS EVAPORADORES	90
5.4.1.2. EVAPORACIÓN.....	91
5.4.1.3. TIEMPO DE ESPERA HASTA LA DESCARGA.....	91
5.4.1.4. VACIAR LOS EVAPORADORES	92
5.4.2. CONTROL DE LA ETAPA	92
5.4.2.1. INSTRUMENTACIÓN	92
5.4.2.2. SEÑALES DE CONTROL	94

5.4.2.3. PROGRAMA.....	94
6. DISEÑO E IMPLANTACIÓN DEL SISTEMA DE SUPERVISIÓN 95	
6.1. OBJETIVOS DEL SISTEMA	95
6.2. ESTRUCTURA DEL SISTEMA.....	96
6.2.1. VENTANA GENERAL.....	96
6.2.1.1. CARACTERÍSTICAS FUNCIONALES.....	97
6.2.1.2. CARACTERÍSTICAS DEL INTERFACE	99
6.2.1.3. VENTANAS SECUNDARIAS	100
6.2.2. VENTANA DE PRODUCCIÓN.....	101
6.2.2.1. CARACTERÍSTICAS FUNCIONALES.....	101
6.2.2.2. CARACTERÍSTICAS DEL INTERFACE	104
6.2.2.3. VENTANAS SECUNDARIAS	104
6.2.3. VENTANA DE ALARMAS.....	104
6.2.3.1. CARACTERÍSTICAS FUNCIONALES.....	105
6.2.3.2. CARACTERÍSTICAS DEL INTERFACE	106
6.2.3.3. VENTANAS SECUNDARIAS	106
6.2.4. VENTANA DE CONSIGNAS.....	107
6.2.4.1. CARACTERÍSTICAS FUNCIONALES.....	108
6.2.4.2. CARACTERÍSTICAS DEL INTERFACE	109
7. CONCLUSIONES 110	
7.1. OBJETIVOS CUMPLIDOS Y NO CUMPLIDOS	110
7.2. CONCLUSIONES.....	111
7.3. TRABAJO FUTURO	111
BIBLIOGRAFÍA..... 113	
ÍNDICE DE FIGURAS	
INDICE DE TABLAS	116
ANEXO	
A1. PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN DE LOS SENSORES ULTRASÓNICOS	
A2. CÓDIGO FUENTE DEL PROGRAMA DEL PLC	
A3. CÓDIGO FUENTE DE LOS SCRIPTS ASOCIADOS A LA APLICACIÓN DE SUPERVISIÓN	

1. INTRODUCCIÓN

1.1. MOTIVACIÓN Y ALCANCE DEL PROYECTO

El Departament de Telecomunicació i d'Enginyeria de Sistemes dispone en uno de sus laboratorios de una planta industrial, a escala de laboratorio, que permite la producción y envasado de líquidos.

Esta planta piloto está compuesta por tres etapas de proceso: evaporación, mezcla y embotellado. Dispone de dos evaporadores de tamaño y características distintas, dos tanques mezcladores iguales y dos tanques de embotellado, también iguales. La topología de elementos de la planta y su conexionado permite simultáneamente la producción y el envasado de **cantidades** (volumen de producción: primer requisito de producción) prefijadas de uno o dos **tipos** (calidad de producto: segundo requisito de producción) de líquidos.

Para obtener una descripción detallada de los aspectos generales de funcionamiento de la planta puede consultarse el capítulo 3. Como consecuencia de dicha funcionalidad, en el capítulo 5 se recogen los aspectos de detalle de la implementación del control necesario para cada una de las etapas.

Más allá de los detalles concretos de funcionalidad de la planta, resulta evidente que para cumplir con los objetivos de producción del proceso será necesario implementar determinadas acciones de control sobre las distintas etapas de la planta, lo que implica disponer de la instrumentación de control necesaria. En este sentido, comentar que la planta, al inicio del proyecto, se encontraba completamente instrumentalizada a nivel de:

- Sensores de las distintas variables de proceso:
 - Continuas: caudal, nivel.
 - Discretas: interruptores de fin de carrera.
- Actuadores: bombas, electroválvulas y sistemas de calentamiento de líquidos.
- Unidades locales de control: PLC (Siemens) y reguladores industriales (TROVIS).
- Ordenador personal (PC).
- Sistemas subsidiarios:
 - Acondicionamiento de señales de control (amplificadores de señal).
 - Sistema de comunicaciones industriales entre los distintos elementos del sistema de control (tarjetas de comunicaciones, cables normalizados, etc.).

Así como el software necesario para la configuración de los distintos elementos del sistema de control.

Antes del inicio del proyecto, el sistema de control existente constaba de los siguientes elementos:

- Unidades locales de control:

- Micro-PLC (Izumi): Tenía implementadas funciones de lógica secuencial programada.
- Reguladores TROVIS (2 unidades): En ellos se implementaba el control PID de caudales del proceso (etapa de mezcla)
- Ordenador de proceso: contenía una aplicación sencilla, en la que coexistían funciones de:
 - Regulación de variables de proceso (niveles), mediante control PID, con el consiguiente envío de señales de control desde el propio PC.
 - Cálculo y envío de valores de set-point a los reguladores industriales TROVIS.
 - Funciones de supervisión sencillas. Básicamente, monitorización de algunas variables de proceso.

Así pues, el objetivo general del presente proyecto consiste en sustituir este sistema de control primitivo por un sistema de control de características más habituales a nivel industrial que, adicionalmente, incremente la funcionalidad del primero, principalmente respecto a las funciones de supervisión del sistema.

Por tanto, la motivación en cuanto al diseño de este sistema de control es doble:

- Por un lado, separar completamente las funciones de control y de supervisión en elementos diferentes, como es habitual a nivel industrial, incrementando así la fiabilidad del sistema de control en su conjunto.
- Por otro lado, incrementar la funcionalidad del primer sistema de control, especialmente en lo que se refiere a la funcionalidad de supervisión.

1.2. OBJETIVOS DEL PROYECTO

Para dar respuesta a las necesidades expuestas en el apartado anterior, se plantea el diseño de un sistema SCADA, con tres niveles diferenciados:

- Nivel de proceso, o de campo: Compuesto por la instrumentación de campo (sensores y actuadores) y los elementos de proceso (tanques, evaporadores, etc.).
- Nivel de control: Compuesto por dos tipos de unidades locales de control:
 - PLC (Siemens): En él se implementarán tanto funciones de lógica secuencial programada, como de regulación (mediante control PID) de variables de proceso.¹
 - Reguladores TROVIS (2 unidades): En ellos se implementará el control PID de caudales del proceso (etapa de mezcla).²

¹ Este PLC ya había sido adquirido al inicio del proyecto.

² La justificación de las distintas funciones de control puede consultarse en el capítulo 3. En el capítulo 5 se recogen los detalles de implementación de dichas funciones, para cada etapa de proceso.

- Nivel de supervisión: Aplicación SCADA, implementada mediante el software industrial Intouch de Wonderware.³

Así pues, el objetivo general del proyecto consiste en el diseño e implantación de dicho sistema SCADA, y se traduce en una serie de subobjetivos:

- Revisión y puesta a punto de instrumentación de campo y elementos de proceso:
 - Revisión y calibración de sensores.
 - Revisión, ajuste y determinación de las curvas de funcionamiento de actuadores.
 - Revisión del cableado de las señales de control analógicas.
 - Mejoras en algunos elementos de proceso (tanques de embotellado, tubos de silicona).
- Creación del sistema de control:
 - Análisis de los requerimientos del sistema de control (ver capítulo 3 y 5).
 - Implementación de un proyecto Step7⁴ para la programación y configuración del PLC.
 - Configuración y sintonía de los reguladores industriales Trovis.
 - Implementación del bus de campo a nivel de control. Conecta el PLC con dos actuadores inteligentes (ver capítulo 4.3.1).
 - Revisión del cable normalizado del bus y del elemento esclavo de la comunicación.
- Creación del sistema de supervisión:
 - Análisis de los requerimientos para la aplicación (ver capítulo 6).
 - Creación de la aplicación de supervisión.
 - Implementación del bus de campo a nivel de supervisión (ver capítulo 4.3.2).
 - Creación del cable normalizado.
 - Configuración del servidor OPC, cliente OPC y enlaces PC-PLC.

1.3. ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA

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

- En el capítulo 2 están expuestos los conceptos teóricos necesarios para entender todo el trabajo realizado, explicado en capítulos posteriores.
- Mediante el capítulo 3, se presenta la planta desde un punto de vista funcional, exponiendo los requisitos de producción que se derivan y la distribución de los elementos que forman la estructura del sistema SCADA.

³ La relación de funciones de supervisión implementadas, así como los detalles de dicha implementación, pueden consultarse en el capítulo 6.

⁴ Software que permite programar y configurar el PLC

- El capítulo 4 se ha dedicado a las tecnologías utilizadas para la implementación del sistema SCADA. En concreto se presentan los instrumentos de control que se usarán, el software mediante el cual se programarán y configurarán algunos instrumentos de control, así como el utilizado en la programación de la aplicación de supervisión. Por último se verá la configuración y las características de la comunicación implementada en este sistema SCADA.
- El capítulo 5 está dedicado a la explicación del control implementado en la planta. También se han expuesto las características básicas de la instrumentación utilizada (actuadores, sensores y elementos de proceso).
- En el capítulo 6 se ha explicado con detalle la aplicación de supervisión a partir de unos requerimientos (objetivos) que ésta deberá cumplir.
- En el capítulo 7 están expuestas las conclusiones extraídas de la realización del proyecto, analizando los objetivos cumplidos y el trabajo futuro que se podría realizar a partir de este trabajo.

Por último, se ha incluido un capítulo de bibliografía y otro de índices de tablas y figuras que aparecen a lo largo de esta memoria, así como un anexo en el que se reflejarán aspectos como, por ejemplo, el código fuente del programa del PLC implementado.

2. FUNDAMENTOS

Cada vez está más presente la necesidad de las empresas por apostar en tecnologías para automatizar su producción. El fin es obtener una alta competitividad en el mercado, ya que se reducen tiempos de ciclo, se aumenta la flexibilidad, así como la calidad del producto y la seguridad en la fabricación. (OPTI 2008)

De forma general, se puede decir que la automatización industrial consiste en el uso de sistemas o elementos computarizados (PLC's, PC's,...) para controlar maquinarias y/o procesos industriales.

Con el objetivo de llevar a cabo un sistema SCADA que controle el proceso de la planta piloto del proyecto, se necesita conocer cuestiones tales como: la tecnología que se utilizará, el modelo de automatización que se seguirá, el tipo de procesos que se tratarán o la red de comunicación que se realizará. Así pues, en este capítulo se introducirán los aspectos teóricos necesarios para fundamentar las tareas a realizar durante el proyecto.

2.1. AUTOMATIZACIÓN INTEGRADA

La automatización integrada surge debido a las exigencias de los procesos de producción, cada vez más complejos, que requieren de una estructura bien definida que garantice la compenetración de todas las tareas productivas.

Un modelo de automatización consiste en una manera genérica de organizar e integrar componentes de sistemas a fin de lograr un eficiente proceso productivo. La mayoría responden a estructuras jerárquicas estáticas con tareas separadas y funciones especializadas, o a estructuras heterárquicas.

MODELOS JERÁRQUICOS	MODELOS HETRÁRQUICOS
Basado en jerarquías	Se prohíbe todo tipo de jerarquía (arquitectura plana)
Estructuras relativamente rígidas	Buen rendimiento ante cambios
Autonomía débil	Total autonomía local
Possible propagación de fallas	Robustez y flexibilidad para evitar la propagación de fallas
Coordinación ejecutada en los niveles superiores de la arquitectura	Posibles problemas de coordinación

Tabla 1: Comparativa de los dos modelos de Automatización Integrada

Así pues, un modelo de automatización debe:

- permitir la descripción de todos los aspectos del ciclo de vida del sistema, abarcando todos los conceptos involucrados en el proceso.
- incorporar diferentes puntos de vista para describir por completo el proceso productivo, tales como información y control, equipos, mano de obra, organización gerencial así como las relaciones con otros procesos.
- ser independiente de la tecnología existente.
- estar abierto a la estandarización.

Además tiene que aportarnos los siguientes beneficios:

- presentar una visión completa del proceso de automatización.
- permitir determinar el mejor método para la automatización.
- considerar la asignación errónea de recursos o fallas en el proceso.
- la creación de diferentes arquitecturas a partir de modelos referenciales basados en las principales ventajas de las mismas.

2.1.1. MODELOS JERÁRQUICOS

Los modelos jerárquicos son aquellos que presentan las siguientes características:

- Siguen la estructura humana gerencial de la planta.
- Promueven el principio de autonomía (la responsabilidad puede ser delegada hacia los niveles inferiores de la jerarquía).
- Promueven el principio de localidad (las unidades de la planta son usualmente distribuidas pero también usualmente comprimidas donde el control distribuido puede ser aplicado).
- Permiten la distribución de las tareas de la planta a sistemas multicomputacionales debido a la disposición en capas de las funciones de control dentro de la jerarquía.
- Existe flexibilidad en la introducción de nuevas tecnologías.
- Las funciones más altas de la jerarquía tienden a enfocarse en planificación, mientras que los niveles bajos se centran en la ejecución.
- Necesidad de limitar la complejidad de entidades individuales para facilitar la comprensión humana y la manejabilidad computacional.
- Tienen robustez, predictibilidad y eficiencia.

Como ventajas, los modelos jerárquicos disuelven el vínculo entre el tamaño y la complejidad, en virtud de la jerarquía, puesto que tal como se evalúa desde cualquier posición dentro de ella es casi independiente de su tamaño total. Además se reduce la necesidad de transmisión de información entre los diferentes elementos que conforman la organización. Un nivel solo necesita información detallada sobre las actividades correspondientes a su nivel e información adicional sobre el comportamiento medio en otras unidades.

Por el contrario, estos modelos tienen una estructura rígida que les impide reaccionar de una manera ágil ante variaciones, ya que los distintos niveles de la jerarquía no pueden tomar la iniciativa. De esta manera, el sistema será vulnerable ante perturbaciones y su autonomía y reactividad ante disturbios serán débiles, obteniendo una arquitectura costosa de desarrollar y difícil de mantener.

La modificación de las estructuras automatizadas para agregar, quitar o cambiar recursos es difícil, ya que requiere actualización de todos los niveles para reconocer el estado de todo el sistema. Además, los fallos ocurridos en niveles inferiores se propagan hacia los superiores invalidando en algunos casos la planificación y afectando el funcionamiento de las demás tareas inherentes a la automatización.

Los modelos jerárquicos más importantes son los siguientes:

Modelo de Automatización Piramidal

Es el modelo más difundido en el ambiente de producción continua por la ISO⁵, consta de cinco niveles que abarcan las diferentes funciones de una planta coordinada de manera jerárquica, cubriendo desde los aspectos de control de los procesos físicos en su nivel más bajo, hasta los niveles donde se realizan las funciones corporativas de la planta. Cada nivel se caracteriza por un tipo de información y de procesamiento diferente, siendo necesaria la integración del proceso automatizado para incluir la comunicación interna en cada nivel, y entre niveles, con el fin de lograr sistemas que permitan ejecutar las diferentes tareas de control existentes en una empresa.



Figura 1: Modelo de automatización Piramidal

En este proyecto se implementarán las tareas correspondientes a las 3 capas más bajas de ésta pirámide:

⁵ International Organization for Standardization: www.iso.org

- En la *capa de proceso* se realizarán tareas de: captación, mediante sensores de las medidas de las variables de proceso; y acondicionamiento de las señales de control que se envían a los actuadores.
- En la *capa de control local* se realizarán tres tareas: la primera de control secuencial de procesos batch; la segunda de regulación de variables de proceso (en el proyecto, variables de nivel y de caudal); y la tercera de configuración de un bus de campo. Para realizar dichas tareas, se utilizaran dos tipos de unidades locales de control: un PLC y dos reguladores industriales. El primero realizará todas las tareas, mientras que los segundos regularán, mediante un lazo de control, variables de caudal.
- En la *capa de supervisión* se configurará una red de supervisión, y se utilizará un PC para implementar el software SCADA.

Modelo de Referencia CIM

Este modelo divide las tareas del control de la planta en capas funcionales. Es representado desde el punto de vista jerárquico por una estructura de 11 capas, donde los elementos físicos del sistema son representados por las 5 capas inferiores mientras que los elementos de software son representados por las 6 capas superiores.

PABADIS (Plant Automation Based on Distributed Systems)

Basado en la automatización utilizando sistemas distribuidos, reduce la jerarquía a dos capas, disuelve la capa de supervisión y divide su funcionalidad en un parte centralizada que puede ser ubicada dentro del sistema de planificación y una parte descentralizada que puede ser implementada por agentes móviles.

METAS Método para la Automatización Integral de Sistemas de Producción Continua

Propone la incorporación de actividades de modelaje orientado a objetos para la representación de los procesos de negocios y para la organización de la información. Hace referencia a un modelo de automatización útil para la caracterización y ubicación de los sistemas encontrados en la empresa y las funciones llevadas a cabo por ellos. Propone la representación de la empresa por medio de caras que abarcan diferentes áreas de la misma agrupando las tareas de planificación, coordinación, supervisión y control.

MRAI Modelo Referencial de Automatización Integral

Está fundamentado en la clásica pirámide de automatización y contempla, además del proceso físico inherente a la actividad central de una empresa de producción, cinco capas o elementos integrados que representan diferentes aspectos de una empresa: arquitectura de procesos de decisión, de objetos de datos, de aplicaciones de software, de tecnologías de información y comunicaciones, y de tecnologías de producción.

2.1.2. MODELOS HETERÁRQUICOS

Tienen un buen rendimiento ante cambios y pueden adaptarse continuamente a su entorno, se basan en la fragmentación del sistema en unidades pequeñas y completamente autónomas. Las arquitecturas heterárquicas se fundamentan en una total autonomía local (control distribuido) resultando en un entorno en el cual los componentes cooperan para alcanzar objetivos globales gracias a la toma de decisiones locales. Estos componentes autónomos son agentes, y la cooperación se estructura a través de protocolos de negociación. El enfoque heterárquico prohíbe todo tipo de jerarquía con el objetivo de dar todo el poder a los módulos básicos. Se desempeñan generalmente en entornos simples.

Al eliminar las relaciones de jerarquía en el sistema los módulos cooperan como iguales dando lugar a una arquitectura plana en lugar de asignar relaciones de subordinación y supervisión. Para proveer la robustez y flexibilidad necesaria se establecen esquemas de comunicación, donde al existir fallas en un módulo otro pueda ejecutar sus actividades. El punto principal en los modelos heterárquicos es la coordinación para prevenir la existencia de anarquías en la arquitectura y aprovechar las ventajas de distribución, modularidad, mantenimiento y reconfiguración.

Estos modelos se caracterizan por:

- Los diferentes elementos de la arquitectura se comunican como iguales sin existencia de jerarquías, a través de reglas que definen las negociaciones y cooperación entre las tareas.
- Debe ser capaz de auto-configurarse, ser escalable y tolerante a fallas.
- Especial énfasis en el proceso de coordinación, ya que no existen niveles superiores que observen a todo el sistema ni información global del mismo.

Los modelos heterárquicos más relevantes son:

PROSA Process Resource Order Staff Architecture

Propone la descentralización de las decisiones por medio de la atribución de cierto nivel de dependencia a cada unidad que compone la arquitectura, la cual básicamente se compone de

3 entidades semi-independientes y cooperantes denominadas holones con capacidad de tomar decisiones y ejecutar acciones.

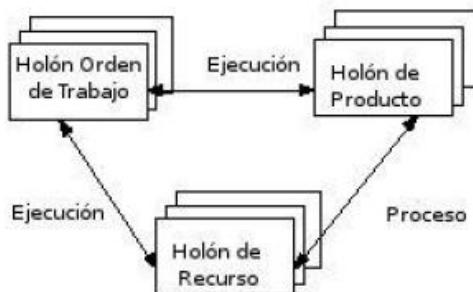


Figura 2: Modelo heterárquico PROSA

PROHA Product Resource Order Heterarchical Architecture

Modelo construido a partir de PROSA, basado en el planteamiento de un sistema heterárquico de agentes deliberativos. Se adapta a los sistemas de grandes dimensiones y alta complejidad ya que permite crear sistemas software que representan cada uno de los elementos que configuran el sistema productivo.

(Rivas 2006)

2.2. UNIDADES LOCALES DE CONTROL

En un proceso industrial, generalmente, se producen muchos ruidos que pueden interferir en la transmisión de las señales, en los elementos de control, etc. Por eso, dichos elementos y protocolos de comunicación tienen que ser robustos para soportar las duras condiciones del entorno. Así pues, se podría definir a las unidades locales de control mediante las siguientes características básicas:

- Deben ser capaces de controlar un proceso, subproceso, o variable de proceso industrial, a nivel de secuencialización o de regulación.
- Deben soportar condiciones de trabajo extremas.
- Su localización en la planta debe ser cercana al proceso, evitando interferencias en las señales de control.
- Deben ser programables y/o configurables.

Los tres elementos básicos capaces de cumplir estas características son el autómata programable (PLC), el ordenador industrial, y los reguladores industriales (analógico o digital). Estos tres comparten protagonismo y es frecuente encontrar artículos de opinión donde se comenta el futuro de la utilización de los PLCs ante las continuas mejoras del control realizado mediante ordenador. Disputas aparte, cada uno de estos elementos halla su aplicación en la industria actual, y es por ello que la tendencia en los próximos años sea la de continuar utilizando estos elementos. (Ponsa Asensio y Vilanova Arbós 2004)

A continuación se analizarán las características de los dos componentes anteriores que se han utilizado en el proyecto, el PLC y los reguladores industriales.

2.2.1. EL PLC EN LA AUTOMATIZACIÓN

El control de las instalaciones industriales modernas comenzó haciéndose a base de lógica cableada, en la que relés y contactores combinaban sus acciones para obtener el control deseado. A medida que las necesidades, así como la complejidad de las instalaciones, fueron aumentando, el cableado de control adquiría dimensiones difícilmente abordables y de complicado mantenimiento.

Seguidamente aparecieron los procesadores, que permitieron sustituir poco a poco determinados lazos de control destinados a tareas concretas por estos nuevos equipos programados y, como consecuencia, se consiguió simplificar notablemente el conjunto. Poco a poco los sistemas basados en microprocesadores fueron haciéndose con el mercado de control industrial, era más barato y más sencillo que la lógica cableada, hasta el punto de derivar en los actuales autómatas programables industriales, los PLC.

Por definición, un PLC es un equipo electrónico, programable en lenguaje no informático, diseñado para controlar en tiempo real y ambiente industrial, procesos secuenciales. Un PLC trabaja en base a una información recibida por los captadores del proceso, siguiendo un programa lógico interno, y actuando sobre los actuadores de la instalación.

2.2.1.1. FUNCIONES DE UN PLC

Los PLCs industriales cada vez están teniendo un rango de aplicaciones más amplio a medida que aumentan las prestaciones de la microelectrónica y las comunicaciones. Para citar sus funciones se distinguirá entre funciones básicas, y funciones nuevas. Las primeras son todas aquellas que han permitido que el PLC haya sido tan bien aceptado por la industria. Las segundas serán aquellas que están permitiendo a los PLCs obtener grandes prestaciones.

Funciones básicas

Detección

Lectura de la señal de los captadores distribuidos por el sistema de fabricación.

Mando

Elaborar y enviar las acciones al sistema mediante los accionadores.

Diálogo hombre-máquina

Mantener una interacción con los operarios de producción, obedeciendo sus consignas e informando del estado del proceso.

Programación

Para introducir, elaborar y cambiar el programa de aplicación del autómata.

Nuevas funciones

Redes de comunicación

Permiten establecer comunicación con otras zonas de control. Permiten la comunicación y el intercambio de datos entre autómatas en tiempo real.

Sistemas de supervisión

Permiten la comunicación con ordenadores provistos de software de supervisión industrial. Esta comunicación se realiza o bien por una red industrial, o simplemente por el puerto serie del ordenador.

Control de procesos continuos

Los autómatas llevan incorporadas funciones que permiten el control de procesos continuos, como por ejemplo, módulos de E/S analógicas o la posibilidad de ejecutar controles tipo PID programados intrínsecamente en el autómata.

Entradas-Salidas distribuidas

En algunos casos, los módulos de E/S no tienen por qué estar ubicados físicamente en el armario del autómata, sino que pueden estar distribuidos por la instalación y comunicarse con la unidad central del autómata mediante cable de red.

Buses de campo

Mediante un solo cable de comunicación se pueden conectar al bus sensores y actuadores, reemplazando el cableado tradicional.

2.2.1.2. ESTRUCTURA DE UN PLC

Los PLCs actuales se pueden clasificar en función de dos criterios. Por un lado, según su configuración externa, la cual reflejará de qué manera y dónde están colocados los distintos elementos que componen el autómata programable. Por otro lado, se distinguirán según su estructura interna, que reflejará cuáles son dichos componentes.

El término estructura externa hace referencia al aspecto físico del PLC, como son sus elementos, en cuántos está dividido, etc. Actualmente son tres las estructuras más significativas del mercado:

1) Estructura compacta

Los autómatas que siguen esta estructura se caracterizan por llevar en un solo bloque todos sus elementos (fuente de alimentación, CPU, E/S,...). Generalmente son autómatas de gama baja o nano-autómatas. Su potencia de proceso suele ser muy limitada dedicándose a controlar máquinas pequeñas o cuadros de mando. En la siguiente figura se muestra un PLC compacto de la marca OMRON.



Figura 3: Fotografía de un PLC compacto de la marca OMRON

2) Estructura semi-modular

Se caracteriza por separar las E/S del resto del autómata. Así pues, en un bloque compacto encontraremos la CPU, la memoria y la fuente de alimentación. Podríamos generalizar diciendo que los autómatas de gama media suelen responder a una estructura semi-modular.

3) Estructura modular

Existe un módulo para cada uno de los componentes del PLC. La sujeción de los mismos se hace mediante carril normalizado, placa perforada o sobre RACK, en donde va alojado el bus externo de unión de los distintos módulos que lo componen. Podemos generalizar diciendo que son autómatas de gama alta. El PLC utilizado en este proyecto corresponde a esta estructura.

En cuanto a la estructura interna, distinguiremos entre los componentes básicos y los necesarios para que el sistema sea operativo.

De los componentes básicos destacamos la CPU y las Entradas y Salidas. Teóricamente con dichos elementos ya se tendría un autómata, pero es intuitivo ver que sin otros componentes tales como una fuente de alimentación, los primeros no son operativos. La CPU es la parte inteligente del sistema e interpretará las instrucciones del programa usuario. Estará compuesta por un Procesador, una Memoria, y por Circuitos auxiliares (como una ALU, los Flags, el Contador de Programa, etc.).

Otros componentes como la Fuente de Alimentación, las interfaces de las E/S o los dispositivos periféricos complementan la estructura interna de un PLC y le hacen adoptar cierta operatividad, en muchos casos adaptable al tipo de proceso a controlar.

2.2.1. REGULADORES INDUSTRIALES

Los reguladores industriales son dispositivos generados de forma clara para la regulación continua de variables. Crean la señal de control del proceso mediante la diferencia existente entre la consigna entrante y el valor real de la variable a controlar (señal de error). A esta señal se le pueden aplicar tres acciones distintas:

- Acción proporcional (P).
- Acción integral (I).
- Acción derivativa (D).

Antiguamente los reguladores (PID) eran analógicos, pero a partir de la aparición de los microprocesadores, ha sido posible implementar reguladores industriales digitales mucho más simples y dotados de mejores prestaciones (i.e. incorporación de salidas especiales para llevar un histórico de la variable/s controlada/s).

Puesto que los reguladores industriales digitales son los que se utilizan actualmente en la industria, y en este proyecto, seguidamente se analizará su funcionamiento y sus elementos básicos que lo conforman.

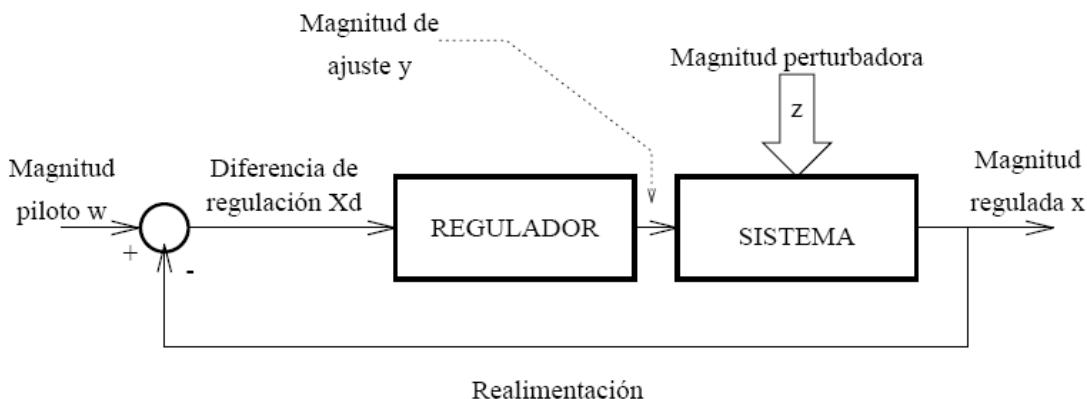


Figura 4: Esquema funcional de un regulador PID industrial. Existen muchas notaciones de los elementos que conforman el lazo, como por ejemplo Magnitud piloto = consigna

El funcionamiento es el siguiente:

- La magnitud regulada es leída y cuantificada en intervalos de tiempo discretos.
- La operación PID es realizada por un algoritmo que está disponible en un procesador, y en cada punto de lectura se calcula una igualdad diferencial. Las partes P, I, D pueden ser ajustadas de forma independiente.

- Por último el valor calculado es conectado al tramo de regulación después de pasar por un convertidor digital-analógico y mantenido hasta la llegada del siguiente valor.

Los elementos básicos de un regulador industrial digital son:

- La consigna, magnitud piloto o setpoint (w), proporcionada al regulador de dos maneras posibles: o bien externamente, mediante una señal entrante al regulador; o bien internamente, mediante las teclas del propio dispositivo. Esta señal la utilizará el regulador para obtener la señal de error (o diferencia de regulación).
- La entrada al regulador (x), corresponderá a la señal obtenida de la variable a regular. Ésta vendrá proporcionada por un sensor y servirá, junto con la consigna, para obtener la señal de error, a la que posteriormente se le aplicarán las tres acciones características.
- La salida hacia el actuador (y), correspondiente a la actuación del regulador una vez aplicadas las acciones PID.

En su modo principal de funcionamiento, el regulador se comporta de un modo casi igual al de los controladores analógicos, con unas ventajas adicionales:

- **Flexibilidad:** Las funciones técnicas de regulación se realizan por software (programas), modificándose sin que el constructor tenga que cambiar el hardware (cableado interno) y pudiendo ser usadas por el usuario en diversas partes del proceso.
- **Multiplicidad de funciones:** Algunos ejemplos son:
 - Comutación automática del servicio manual/automático libre de saltos.
 - Evitar la saturación del término integral al alcanzar un límite del valor prescrito (referencia).
 - Limitación ajustable del valor de referencia.
 - Rampa parametrizable del valor prescrito.
 - Filtrado de magnitudes del proceso sometidas a perturbaciones.
- **Exactitud:** Al ser los parámetros ajustados digitalmente libres de deriva, y ajustados a voluntad, no presentan problemas en la realización de operaciones matemáticas.

(CONTROL DE PROCESOS CON CONTROLADORES PID INDUSTRIALES s.f.)

2.3. SUPERVISIÓN DE PROCESOS INDUSTRIALES

La labor de un supervisor representa una tarea delicada y esencial desde el punto de vista normativo y operativo; de ésta acción depende en gran medida garantizar la calidad y eficiencia del proceso que se desarrolla. En el supervisor descansa la responsabilidad de orientar o corregir las acciones que se desarrollan.

De esta manera, existe software industrial que permite la implementación de sistemas de supervisión (i.e. sistemas SCADA), mediante los cuales un operario podrá controlar el proceso productivo a través de la visualización de variables en tiempo real. En caso de que se produzca

alguna falla en la planta (i.e. alguna variable fuera de rango), el software permitirá al operario actuar sobre el proceso para corregirla.

(Sistemas SCADA 2004)

2.3.1. SISTEMAS SCADA (SUPERVISORY CONTROL AND DATA ACQUISITION)

Los sistemas SCADA proveen de una perspectiva integrada de todos los recursos de control e información de la planta. De esta manera, los ingenieros, supervisores, u operadores pueden visualizar e interactuar con los procesos mediante representaciones gráficas de los mismos.

Además, provee de toda la información que se genera en el proceso productivo a diversos usuarios, tanto del mismo nivel como de otros sectores dentro de la empresa: control de calidad, supervisión, mantenimiento, etc., en un marco de modelo de automatización piramidal. (TECMES s.f.)

Las características básicas de un sistema SCADA son las siguientes:

- Adquisición y almacenado de datos, para recoger, procesar y almacenar la información recibida de forma continua y confiable.
- Representación gráfica y animada de variables de proceso y monitorización de éstas por medio de alarmas.
- Ejecutar acciones de control, para modificar la evolución del proceso, actuando bien sobre los reguladores autónomos básicos (consignas, alarmas, menús, etc.), bien directamente sobre el proceso mediante las salidas conectadas.
- Arquitectura abierta y flexible con capacidad de ampliación y adaptación.
- Conectividad con otras aplicaciones y bases de datos, locales o distribuidas en redes de comunicación (i.e. MS Excel, SQL)
- Supervisión, para observar desde un monitor la evolución de las variables de control.
- Transmisión de información con dispositivos de campo y otros PC.
- Base de datos, gestión de datos con bajos tiempos de acceso. Suele utilizar ODBC.
- Presentación, representación gráfica de los datos. Interfaz del Operador o HMI (Human Machine Interface).
- Explotación de los datos adquiridos para gestión de la calidad, control estadístico, gestión de la producción y gestión administrativa y financiera.
- Alertar al operador de cambios detectados en la planta, tanto aquellos que no se consideren normales (alarmas) como cambios que se produzcan en la operación diaria de la planta (eventos). Estos cambios pueden ser almacenados en el sistema para su posterior análisis.

(Sistemas SCADA 2004)

2.4. COMUNICACIONES INDUSTRIALES: PROFIBUS

Las comunicaciones industriales suponen un punto clave en la automatización integrada de procesos industriales, tanto a nivel de campo, de control y de supervisión, como a nivel de planificación y de empresa. Estos dos últimos niveles de la pirámide de automatización integrada requieren altas velocidades y no están sometidos, generalmente, a condiciones industriales, puesto que interactúan equipos de oficina y de departamentos de producción. Los tres primeros niveles, propios en un sistema SCADA, son los que se utilizarán en el proyecto. Puesto que en esta parte inferior de la pirámide encontramos los dispositivos que actúan directamente sobre el proceso productivo, las comunicaciones deben poseer unas características especiales para responder a las necesidades de intercomunicación en tiempo real que se deben producir. Asimismo, tienen que ser capaces de resistir un ambiente hostil donde existe una gran cantidad de ruido electromagnético y condiciones ambientales duras.

En resumen, en el proyecto se tratarán dos tipos de comunicaciones industriales: una a nivel de campo, actuando sobre el proceso directamente, y otra hacia el sistema SCADA. En ambos casos se precisará de una comunicación en tiempo real y su realización se implementará mediante PROFIBUS. Los detalles sobre este sistema de comunicaciones pueden consultarse en el apartado 3, mediante un esquema general y la explicación de ambas comunicaciones.

(Rosado 2006-07)

2.4.1. ORÍGENES Y EVOLUCIÓN

La base de la especificación del estándar PROFIBUS fue un proyecto de investigación (1987-1990) llevado a cabo por los siguientes participantes: ABB, AEG, Bosch, Honeywell, Moeller, Landis & Gyr, Phoenix Contact, Rheinmetall, RMP, Sauter-cumulus, Schleicher, Siemens y cinco institutos alemanes de investigación. Hubo además una pequeña esponsorización por parte del gobierno alemán. El resultado de este proyecto fue el primer borrador de la norma DIN 19245, el estándar PROFIBUS, partes 1 y 2. La parte 3, PROFIBUS-DP, se definió en 1993. Recientes estudios de mercado llevados a cabo por empresas ajenas a la Organización de Usuarios de PROFIBUS señalan a éste como el bus con más futuro en el campo de los procesos industriales. (www.automatas.org 2006)

2.4.2. DEFINICIÓN Y VARIANTES

PROFIBUS especifica las características técnicas y funcionales de un sistema basado en un bus de campo serie en el que controladores digitales descentralizados pueden ser conectados entre sí desde el nivel de campo al nivel de célula. Se distinguen dos tipos de dispositivos. En primer lugar los dispositivos maestros, que determinan la comunicación de datos sobre el bus. Un maestro puede enviar mensajes sin una petición externa cuando posee el control de acceso al bus (el testigo). Los maestros también se denominan estaciones activas en el protocolo PROFIBUS. Como segundo tipo están los dispositivos esclavos, que normalmente son

periferia. Éstos normalmente son aparatos de E/S, válvulas, actuadores y transmisores de señal. No tienen el control de acceso al bus y sólo pueden recibir o enviar mensajes al maestro cuando estén autorizados para ello. Los esclavos también son denominados estaciones pasivas, por lo que sólo necesitan una parte del protocolo del bus. En la figura siguiente encontramos un ejemplo sencillo de una topología de red PROFIBUS, en la que distinguimos claramente los dispositivos maestros y los esclavos.

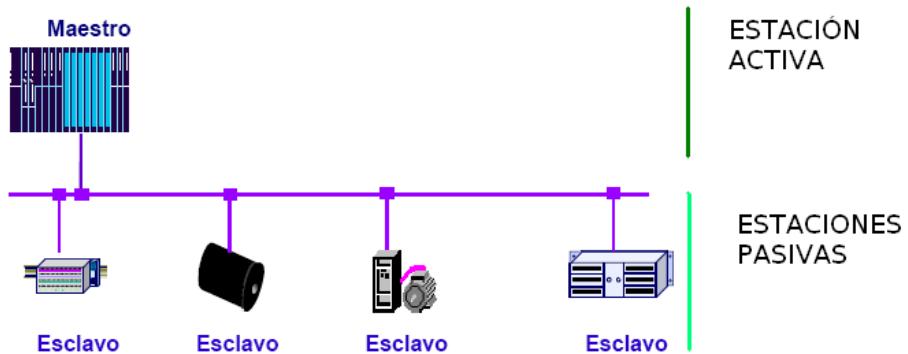


Figura 5: Ejemplo de topología de red PROFIBUS. Se observa una estación activa (maestro) correspondiente a un controlador basado en PLC, y cuatro estaciones pasivas (esclavos) correspondientes a cuatro dispositivos de E/S inteligentes

A nivel de comunicación, PROFIBUS utiliza como referencia el modelo OSI, pero restringido a tres capas, la capa de aplicación (7), la capa de enlace (2) y la capa física (1). A continuación, en la figura se observan las distintas capas del modelo OSI y, en negrita, las que utiliza PROFIBUS.

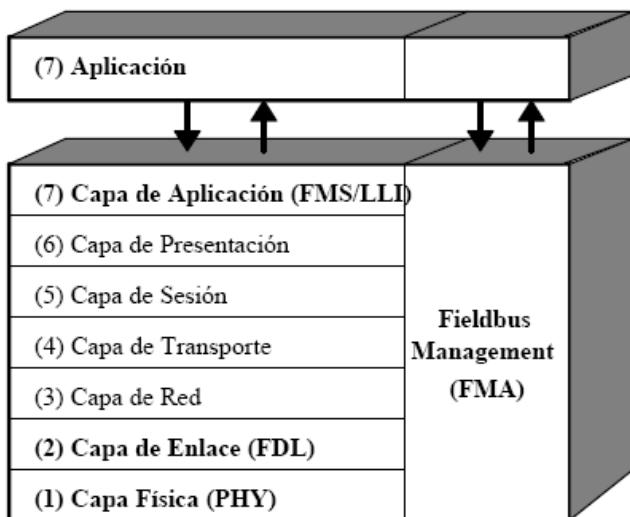


Figura 6: Modelo de referencia OSI. De las 7 capas, PROFIBUS utiliza la 1, la 2 y la 7

La capa de aplicación (FMS/LLI) se caracteriza por ser una normalización diseñada para proporcionar servicios de mensajería entre y con dispositivos programables en entornos CIM, y por definir:

- Un conjunto de objetos FMS que pueden existir dentro de un dispositivo.
- Un conjunto de mensajería para acceder y manipular dichos objetos.
- El comportamiento del dispositivo (de los objetos) frente al conjunto de servicios de mensajería.

Las principales áreas de aplicación son: la transmisión de gran cantidad de datos (i.e. los programas); la integración de varias partes del proceso descentralizadas en un proceso común; y la comunicación entre estaciones inteligentes.

La capa de enlace (FDL) se encarga del intercambio de los mensajes que tienen lugar cíclicamente. Para ello tendrá que controlar el acceso al bus, que puede ser:

- **Paso por testigo** entre estaciones maestras: En este caso se trabajará de acuerdo al método Token-Passing, en el que las estaciones activas obtienen, dentro de un anillo lógico, el derecho a emitir durante un intervalo de tiempo definido. En el transcurso de este lapso de tiempo, este maestro puede comunicar con otros maestros, o bien, en subsistemas de nivel inferior maestro/esclavo, puede encargarse de la comunicación con los correspondientes esclavos.
- **Maestro/Esclavo** entre estación activa y pasiva/s: En este caso el intercambio de datos con los accionadores se realiza principalmente de forma cíclica.

Por último, la capa física (PHY) es la que se encarga del medio físico en el transporte de los datos. En ella observamos las siguientes generalidades. El bus utiliza una línea serie correspondiente a la norma RS-485, mediante dos posibilidades de cable. Por un lado se puede utilizar un par trenzado apantallado, adecuado para ambientes con EMI⁶ elevadas, y por otro lado, un par trenzado sin apantallado, utilizado en ambientes con EMI menores. En la figura adjunta se muestra la distribución de los polos en un conector sub-D. Los datos se transmiten diferencialmente mediante las líneas positiva y negativa (3 y 8 respectivamente), hecho que permite trabajar al bus en ambientes industriales de una manera fiable.

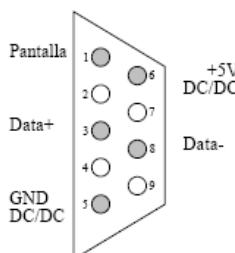


Figura 7: Conector Sub-D con asignación de polos correspondiente al estándar RS-485

⁶ Índice de perturbaciones radioeléctricas

PROFIBUS permite conectar en red un máximo de 127 estaciones (utilizando repetidores), divididas en segmentos de 32 estaciones (sin utilizar repetidores). La velocidad de transmisión dependerá de la longitud entre estaciones. Una distancia mayor requerirá una velocidad baja. Así pues, se puede alcanzar una distancia de 1200 metros a velocidades de 9.6, 19.2 y 93.75 KBaudios; de 600 metros a 167.5 KBaudios; y de 200 metros a 500KBaudios.

La topología del bus será, o lineal con terminadores en ambos extremos y con un máximo de tres repetidores entre dos estaciones, o en forma de árbol permitiendo más de tres repetidores. A continuación, en la figura se observan 2 ejemplos intentando utilizar el número máximo de estaciones.

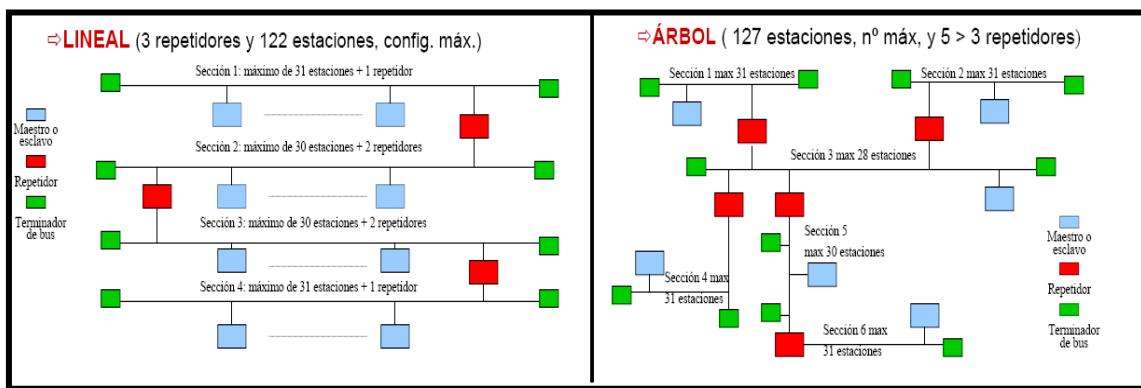


Figura 8: Ejemplo de dos tipos de topología de red PROFIBUS

Dentro del protocolo PROFIBUS existen tres variantes que se ajustan a distintos tipos de aplicaciones de la industria.

En primer lugar se cita el **PROFIBUS-FMS** (Fieldbus Message Specification), adecuado para tareas de comunicación industrial a nivel de célula y de dispositivo de campo. Los servicios FMS ofrecen amplias funcionalidades y elevada flexibilidad para llevar a cabo las transferencias de datos (cíclicas o acíclicas) con velocidad media.

Seguidamente encontramos el **PROFIBUS-DP** (Decentralized Periphery), una versión optimizada en prestaciones y dedicada especialmente a comunicaciones críticas en el tiempo entre sistema de automatización y periféricos distribuidos, trabajando a nivel de campo. A continuación se muestran las características más significativas de esta variante:

- Tiempo de reacción corto.
- Operación Monomaestro o Multimaestro: método de acceso híbrido.
- Protocolo simple, con interfaz de comunicación de bajo coste.
- Excelente diagnóstico: existen varios diagnósticos en maestro y esclavo.
- Interfaz de usuario simple.
- Uso de cableado existente: misma tecnología en todas las aplicaciones.

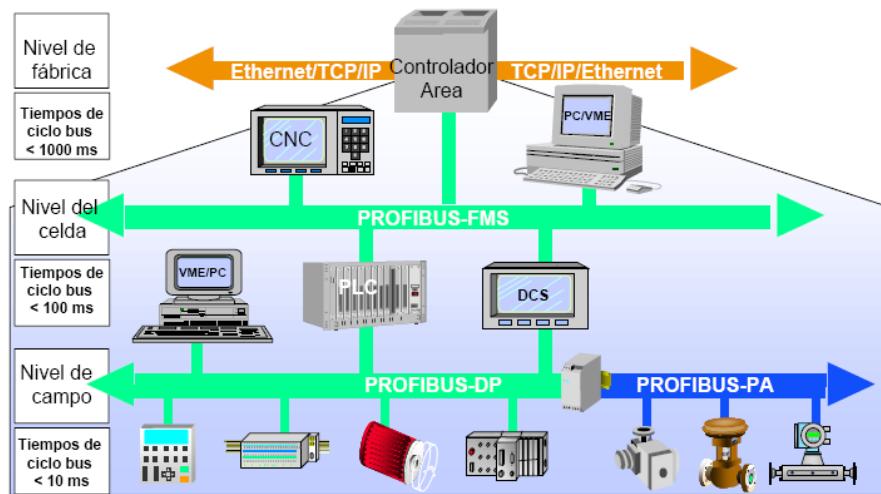


Figura 9: Variantes de PROFIBUS para distintos niveles de trabajo

La tercera y última versión es el **PROFIBUS-PA** (Process Automation), empleada en la automatización de procesos. Se caracteriza por conectar los sistemas de automatización y control de procesos con los dispositivos de campo tales como transmisores y actuadores. A diferencia de la anterior variante, PA permite la comunicación de datos y alimentación a dispositivos mediante el bus de dos hilos incluso en áreas peligrosas. La comunicación en PA es implementada como un sistema parcial incluido en el sistema de comunicación DP.

En la figura 9 se observan los niveles de trabajo para cada variante de PROFIBUS. FMS trabaja más a nivel de célula y DP y PA a nivel de campo, tratando directamente con la periferia. Para acabar de entender el uso de cada una, la figura siguiente contiene un resumen de las prestaciones básicas de cada perfil.

	PROFIBUS-FMS	PROFIBUS-DP	PROFIBUS-PA
Aplicación	Nivel de célula	Nivel de campo	Nivel de campo
Estándar	EN 50 170/IEC 61158	EN 50 170 /IEC 61158	IEC 1158-2
Dispositivos conectables	PLC, PG/PC, Dispositivos de campo	PLC, PG/PC, Dispositivos de campo binarios y analógicos, accionamientos, OPs	Dispositivos de campo para áreas con riesgo de explosión y 31.25 kbit/s
Tiemp. respuest.	< 60 ms	1 - 5 ms	< 60 ms
Tamaño red	<= 150 km	<= 150 km	Máx. 1.9 km
Velocidad	9.6 kbit/s - 12 Mbit/s	9.6 kbit/s - 12 Mbit/s	31.25 kbit/s

Figura 10: Resumen de las prestaciones básicas de los tres perfiles PROFIBUS

2.5. PROCESOS A AUTOMATIZAR

Por proceso se entiende aquella parte del sistema en que, a partir de una entrada de material, energía e información, se genera una transformación sujeta a perturbaciones del entorno, dando lugar a una salida de material en forma de producto. Los procesos industriales se dividen en procesos continuos, procesos discretos y procesos por lotes o *batch*. En este apartado se darán a conocer los dos tipos de proceso que intervienen en el proceso productivo de la planta piloto.

2.5.1. PROCESOS BATCH

Podemos ver los procesos batch como aquellos que nos permiten implementar una secuencialización de operaciones. Un aspecto destacado de éstos es la utilización de recetas (*recipes*). Cada receta describe con toda precisión cada uno de los lotes a fabricar o controlar, convirtiéndose en un elemento de primer orden de cualquier control de proceso por lotes.

Los procesos batch responden perfectamente a las nuevas tendencias del mercado en el sentido de que permiten la producción flexible, es decir, la fabricación de pequeños volúmenes de productos muy diferentes, sin apenas cambios en las instalaciones y equipos. En principio, cambiando la receta de ingredientes y las condiciones de procesado pueden fabricarse productos diversos, lo que permite a los proveedores responder rápidamente a las necesidades cambiantes de sus clientes. Esto también facilita el establecimiento de controles, tanto de los equipos e instalaciones empleados, como de los lotes fabricados (en principio, toda la cantidad de producto de un mismo lote tiene idénticas características, permitiendo asignar un código identificativo que facilita su trazabilidad posterior), lo que es de gran ayuda a la hora de establecer sistemas de aseguramiento de la calidad y la seguridad.

Los procesos por lotes están presentes en una amplia variedad de sectores industriales tradicionales: industria química, de alimentación, farmacéutica, etc., así como en nuevos sectores tecnológicos como el de la biotecnología: reactores de depuración de aguas, procesos de fermentación en biorreactores, etc.

El proceso productivo de la planta piloto del proyecto está dividido en tres etapas, dos de las cuales responden al modelo de proceso batch. En una primera etapa de Evaporación, se tendrá que secuencializar tres tareas, formando la receta de dicha etapa:

1. Llenar el evaporador.
2. Evaporar.
3. Vaciar el evaporador.

Cada proceso completo conformará un lote, resultante de la receta del proceso batch.

En la etapa final de embotellado, se realiza un proceso de este tipo, dónde un lote se produce a partir de la siguiente receta:

1. Llenado de la botella.
2. Estabilización del líquido vertido.
3. Giro de la noria⁷.

2.5.2. PROCESOS CONTINUOS

Los procesos continuos son aquellos cuyo producto final, en lugar de estar formado por un conjunto de elementos separados, está constituido por un material que fluye de forma continua (productos químicos, mezclas de sólidos o de líquidos, etc).

Este tipo de procesos se caracterizan por que en ellos es necesario medir (caudalímetros, sensores de presión, etc.) y controlar elementos (electroválvulas proporcionales, motores, etc.) mediante variables analógicas y algoritmos de control. En la planta, concretamente en la etapa de mezcla, será muy importante controlar las proporciones de los componentes a mezclar, así como el nivel del tanque de mezcla. Para ello, se han implementado dos lazos de control que interactuarán entre sí, uno dedicado al control de caudales, y otro al control de nivel del tanque. Ambos realizan un control continuo, es decir, en constante ejecución.(UAH 2006-07)

⁷ Posteriormente se verá que la noria es un sistema para simular la llegada y salida de las botellas al punto de llenado. Un giro representa que la botella llena se va de dicho punto, y que llega una vacía.

3. VISIÓN GENERAL DEL SISTEMA SCADA

La planta a automatizar en este proyecto está diseñada para elaborar y envasar un tipo de líquido a partir de un proceso dividido en tres etapas:

1. Etapa de evaporación.
2. Etapa de mezcla.
3. Etapa de embotellado.

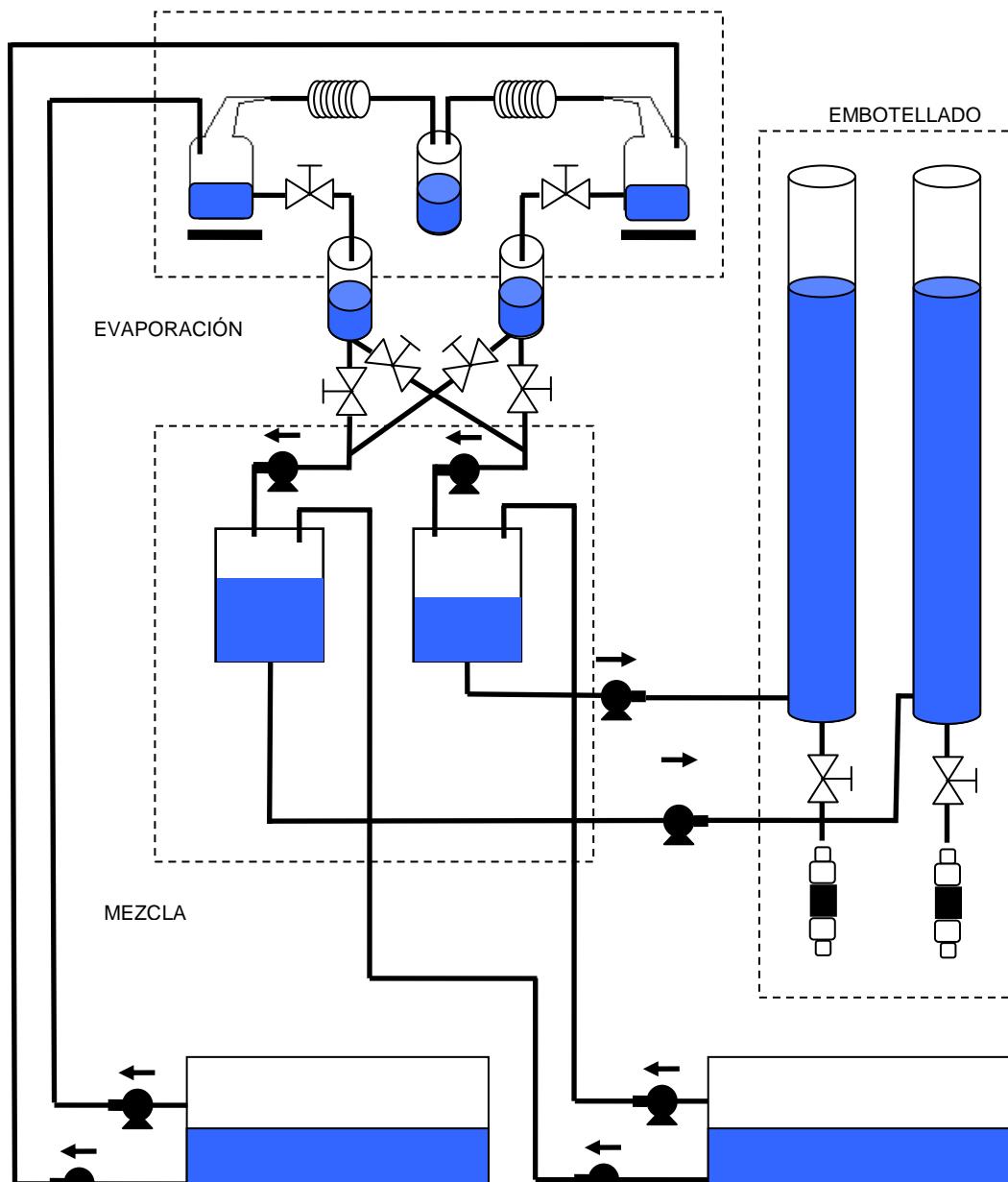


Figura 11: Esquema general de la planta. Las partes centrales de cada etapa están señaladas mediante rectángulos discontinuos.

Como puede verse en la figura 11, la disposición de los elementos principales de cada etapa es la siguiente:

- En la etapa de evaporación se dispone de dos evaporadores más dos tanques de almacenamiento intermedio.
- En la etapa de mezcla se dispone de dos tanques de mezcla.
- En la etapa de embotellado se dispone de dos tanques de embotellado.

Esta topología de elementos, en función de las distintas combinaciones (abierta/cerrada) de las cuatro electroválvulas que conectan las etapas de evaporación y mezcla, permite diferentes configuraciones de trabajo:

- Dos líneas de producción totalmente independientes.
- Una sola línea de producción alimentada desde los dos evaporadores.
- Dos líneas de producción alimentadas desde un solo evaporador.

El concepto de línea de producción se asocia a la pareja tanque de mezcla – tanque de embotellado, cuya unión es inalterable.

A continuación veremos una descripción funcional de la planta resumida, seguida de una breve presentación de los requisitos de producción que ha de cumplir la planta y, para acabar, se expondrá la estructura general del sistema SCADA implementado que pretende dar respuesta a esta funcionalidad.

3.1. DESCRIPCIÓN FUNCIONAL

En la primera etapa, se lleva a cabo un proceso batch:

- Se cargan los evaporadores con cierto volumen de materia prima. Para ello se utilizarán dos bombas.
- Se realiza el evaporado: se calienta la materia prima y se mantiene el tiempo indicado.
- Se espera cierto tiempo antes de vaciar.
- Se vacían los evaporadores por medio de las electroválvulas. El lote de materia creada se deposita en unos tanques de almacenamiento temporal.

En este punto, la materia creada puede tomar distintos caminos por medio del conexionado en cruce que forman las electroválvulas que conectan las etapas de evaporación y mezcla.

La segunda etapa responde a un proceso continuo, y tiene por objetivo mezclar el componente creado en la etapa de evaporación con otro de mezcla, ubicado en un tanque aparte, tal y como se ve en la figura 11. Los dos componentes de mezcla deben mantener una determinada proporción de caudales, que caracteriza el producto final deseado. Para ello se realizarán dos tipos de controles:

- Control ratio: Servirá para obtener la mezcla en la proporción de caudales deseada.

- Control de nivel: Servirá para que en los tanques de mezcla, el producto ya mezclado no sobrepase un valor de set point (parámetro que constituye una variable de decisión a nivel de planificación de la producción).

Una vez realizada la mezcla, el líquido sale de los tanques de dicha etapa mediante la acción de unas bombas. El parámetro fijado para estas bombas constituye también una variable de decisión a nivel de planificación de la producción.

Por último, la etapa de embotellado tendrá por objetivo envasar el líquido elaborado en la etapa de mezcla. Nuevamente se trata de un proceso batch que implica la siguiente secuencia de acciones:

- Llenar la botella con el volumen de líquido indicado.
- Esperar un tiempo determinado para estabilizar el líquido vertido.
- Reponer la botella llena por una vacía, lista para ser llenada.

3.2. REQUISITOS DE PRODUCCIÓN

De la explicación funcional se desprenden dos parámetros productivos a tener en cuenta:

- **Cantidad de producto:** Se traduce en un requerimiento del caudal que deben proporcionar las bombas situadas a la salida de los tanques de mezcla.
- **Calidad del producto:** Se traduce en una relación determinada de caudales entre los componentes de mezcla que debe garantizarse. Relaciones diferentes equivale a productos diferentes.

Estos parámetros, junto con:

- La combinación de electroválvulas abiertas y/o cerradas en la conexión de las etapas de evaporación y mezcla, que determinan la configuración de trabajo de la planta.
- El valor deseado (set point) de nivel en los tanques de mezcla.

constituyen las variables de decisión a nivel de planificación de la producción. En un sistema automatizado que incorpore el nivel de planificación o programación (scheduling) de la producción, estas decisiones, típicamente, serían el resultado de la optimización de algún criterio (normalmente de naturaleza económica), y serían enviadas como consignas al nivel inferior; el nivel de supervisión.

Esto no será así en nuestro caso, puesto que la solución de automatización adoptada es un sistema SCADA; arquitectura de control que cubre sólo los tres primeros niveles de la pirámide (proceso, control y supervisión). Así pues, en el sistema SCADA los valores de estas variables de decisión se asignarán directamente (de forma manual) en la aplicación de supervisión, tal como se explica en el capítulo 6.

3.3. ESTRUCTURA DEL SISTEMA SCADA

Para dar respuesta a la funcionalidad requerida, que acabamos de comentar, se ha diseñado un sistema SCADA cuya estructura general se expone en este apartado.

La implantación de un sistema SCADA requiere trabajar a tres niveles dentro del entorno piramidal de automatización integrada, permitiendo el intercambio de información entre los elementos de la propia capa o de niveles inmediatamente superior o inferior. Éstos, tal y como se ha comentado en el apartado 2.1, son:

- Nivel de Supervisión.
- Nivel de Control.
- Nivel de Campo o de Proceso.

y están compuestos por ciertos elementos, que dan la funcionalidad deseada a la capa, y por una configuración de la comunicación con el nivel superior y/o inferior. En nuestro proyecto, los elementos son:

- **Nivel de supervisión**
 - **PC de supervisión:** se utilizará un ordenador convencional dotado de hardware adicional (lo veremos en el apartado 4.3.2.1.3) y de software industrial (explicado en el apartado 4.2).
- **Nivel de control**
 - **PLC:** se utilizará como unidad de control local y realizará tareas de secuencialización de operaciones y de regulación industrial. Este componente lo veremos en el apartado 4.1.2.1.
 - **Dos Reguladores Industriales (TROVIS 1 Y 2):** realizarán tareas de regulación PID de variables continuas. Están explicados con más detalle en el apartado 4.1.2.2.
- **Nivel de Proceso**
 - **Cuatro actuadores inteligentes (VLT2800):** Se trata de variadores de frecuencia, que actúan sobre las bombas 1, 2, 3 y 4. En el apartado 4.1.1 se explican sus características más significativas, entre las que destaca la posibilidad de comunicación PROFIBUS que poseen los VLT2800 3 y 4.
 - **Conjunto de sensores y actuadores:** Situados a nivel de campo, interactuarán directamente con el proceso productivo.

En cuanto a las necesidades de comunicación, se ha implementado un bus de campo según la tecnología PROFIBUS-DP. Dicho bus comunica el nivel de supervisión (PC) con el de control (PLC) tal y como muestra la figura 12. A su vez, el PLC utiliza el mismo bus para comunicarse con los actuadores inteligentes VLT2800. La configuración de los elementos que intervienen en estos dos niveles de comunicación (supervisión y campo) se verá en el apartado 4.3.

Paralelamente, el PLC interactuará mediante señales de control analógicas sobre los reguladores industriales y el conjunto de sensores y actuadores (incluidos los variadores de frecuencia que no poseen PROFIBUS). Estas señales de control están representadas mediante líneas rojas en la figura 12.

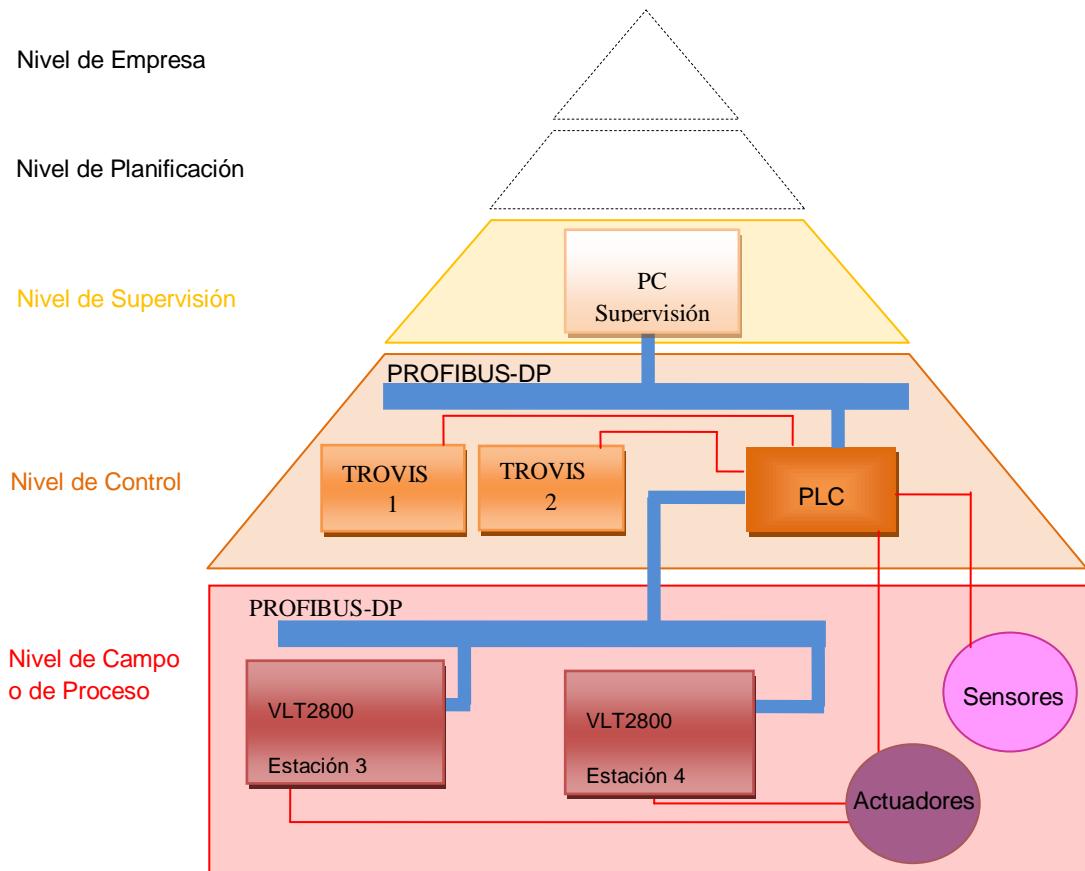


Figura 12: Estructura del sistema SCADA

Tal y como se ha comentado, en el apartado siguiente se presentarán las tecnologías utilizadas para implementar el sistema SCADA, exponiendo las principales características.

El trabajo realizado en la capa de control y proceso se encuentra explicado detalladamente en el capítulo 5 de esta memoria, particularizado para cada etapa del proceso, mientras que el realizado en la capa de supervisión está expuesto en el capítulo 6.

4. TECNOLOGÍAS UTILIZADAS

En este capítulo se presentarán las tecnologías utilizadas para poder realizar el sistema SCADA. Su estructura es la siguiente: en primer lugar se expondrá la instrumentación de control que intervienen en el proceso; seguidamente se conocerá, de manera general, el software necesario para poder realizar el sistema SCADA; por último, se verá cómo se ha configurado la red a nivel de campo y la red a nivel de supervisión.

4.1. INSTRUMENTACIÓN DE CONTROL

En este apartado presentaremos los elementos más destacados que participarán en el control de la planta. Primeramente se expondrán las características básicas de los variadores de frecuencia VLT2800, utilizados para el control de las bombas peristálticas. Seguidamente se mostrarán las unidades de control local.

Remarcar que la instrumentación de más bajo nivel se tratará en el capítulo 5, dónde se presentarán los elementos actuadores, sensores y de proceso.

4.1.1. INSTRUMENTACIÓN INTELIGENTE

En este proyecto se utilizarán un total de cuatro variadores de frecuencia VLT2800 de la marca Danfoss. Éstos son los convertidores más pequeños del mercado. La unidad está diseñada para poder montarse lado a lado. El reducido tamaño del VLT2800, permite cuadros eléctricos más pequeños y por tanto una importante reducción de costos en el diseño total de la aplicación.

Entre sus características destacamos:

- **Flexibilidad**
 - Ajuste Automático de Motor.
 - Calcula los parámetros del motor asegurando un óptimo acoplamiento entre motor y convertidor, de este modo se mejora el rendimiento de la aplicación y se ahorra tiempo de puesta en marcha.
 - Controlador PID. Para un control óptimo del proceso.
 - Parada precisa. Permite sin perdidas de precisión en la parada, la repetición elevada de maniobras de parada.
- **Robusto** El VLT2800 está diseñado para trabajar de forma muy estable en cualquier ambiente industrial. Para asegurar esto, se incluyen como estándar algunas características como:
 - Filtro RFI 1-A. Asegura que la unidad cumpla con los requisitos de la directiva de compatibilidad electromagnética de EMC para ambientes industriales, sin necesidad de equipos adicionales y espacios de panel extras.

- Bobinas CC. Reducen la distorsión por armónicos y elimina la necesidad de instalación de reactancias externas de red. Igualmente, no es necesario la utilización de condensadores para la corrección del factor de potencia. Las bobinas CC incluidas como estándar, evitan la necesidad de instalación de elementos extras y aseguran una vida mayor al convertidor de frecuencia.
- Ventilador. Garantiza que la temperatura de la unidad no sea nunca demasiado elevada, el tipo de ventilador de doble rodamiento permite que el convertidor pueda ser instalado físicamente en cualquier posición, adaptándose a todo tipo de aplicación, ya sea existente o nueva.
- **Facilidad de uso** El VLT2800 se ha diseñado para ser un convertidor de frecuencia versátil y avanzado, y sobre todo, fácil de usar. Esto último se consigue gracias a las siguientes características:
 - Quick Menú (ajuste rápido). Función que incluye únicamente, los parámetros básicos de ajuste para la puesta en marcha. Permite una rápida instalación y por lo tanto un ahorro substancial de tiempo.
 - Comunicación Serie. Todas las unidades disponen como estándar una interface RS 485 con protocolo abierto de Danfoss, sin necesidad de hardware adicional. Las aplicaciones pueden ser analizadas y controladas desde un PC. Además de la facilidad y seguridad de funcionamiento, añade otros beneficios como; reducción de costes de cableado, mantenimiento y puesta en marcha.
 - Opción Bus. Para aplicaciones que exigen elevadas prestaciones, está disponible como opción la interface PROFIBUS DP-V0, como en el caso de nuestro proyecto.

4.1.2. UNIDADES DE CONTROL LOCAL

Para realizar el sistema SCADA se utilizarán, como unidades de control local a nivel de control, un PLC y dos reguladores industriales. Seguidamente se presentan las características más destacadas de cada uno.

4.1.2.1. EL PLC UTILIZADO

El controlador utilizado pertenece a SIMATIC S7 y corresponde a la línea S7-300. Se trata de una línea de miniautómatas modulares y están considerados de gama baja/media. De sus versiones hermanas, S7-200 y S7-400, se puede generalizar diciendo que son de gama baja y gama media/alta respectivamente. Al ser modular existe un gran abanico de módulos de E/S, funcionales, etc., y se caracterizan por ser controladores de instalación simple y sin necesidad de ventilación.

Seguidamente se muestran los componentes que forman nuestro PLC S7-300:

FUENTE ALIMENTACIÓN

PS 307 5A referencia: 6ES7 307-1EA00-0AA0

Dados 120/230V AC nos proporciona 24V DC y 5A.

Mediante esta fuente de alimentación se tendrá que alimentar a la CPU, a los módulos adjuntos, e incluso a sensores que necesiten 24V.

CPU

CPU 315-2DP referencia: 6ES7 315-2AG10-0AB0

Memoria de trabajo 128KB.

0,1ms/1000 instrucciones.

Conexión MPI+DP donde puede ser maestro DP o esclavo DP.

Configuración en varias filas de hasta 32 módulos.

Emisor y receptor para comunicación directa, equidistancia, routing, comunicación S7 (FBs y FCs cargables).

MÓDULO ENTRADAS ANALÓGICAS

AI 8x12Bit referencia: 6ES7 331-7KF02-0AB0

Módulo de entradas analógicas de 4 canales. Cada canal posee 2 entradas haciendo un total de 8 entradas analógicas. En el programa del proyecto las direcciones irán desde la 280 hasta la 295. Cada entrada es una palabra de 2 bytes, 16 bits.

MÓDULO DE SALIDAS ANALÓGICAS

AO 4x12Bit referencia: 6ES7 332-5HD01-0AB0

Módulo de 4 salidas analógicas situadas en el programa entre la dirección 297 hasta la 304.

MÓDULO DE ENTRADAS DIGITALES

DI 16x24DC24V referencia: 6ES7 321-1BH02-0AA0

Módulo de 16 entradas digitales de 24V situadas en el programa del proyecto a lo largo de la dirección 8 (8.0, 8.1,8.7) y 9 (en total 2 bytes, ya que una entrada digital = 1 bit).

MÓDULO DE SALIDAS DIGITALES

DO 8xRelais referencia: 6ES7 322-1HF10-0AA0

Módulo de 8 salidas digitales a lo largo del byte de dirección 12 en el programa. Proporciona a cada salida 230V AC.

MÓDULO DE SALIDAS DIGITALES

DO 16Xac120V/230V/1^a referencia: 6ES7 322-1FH00-0AA0

Módulo de 16 salidas (byte 16 y 17 en nuestro programa) con una tensión de carga de 120V/230V AC.

(SIEMENS, www.automation.siemens.com s.f.)

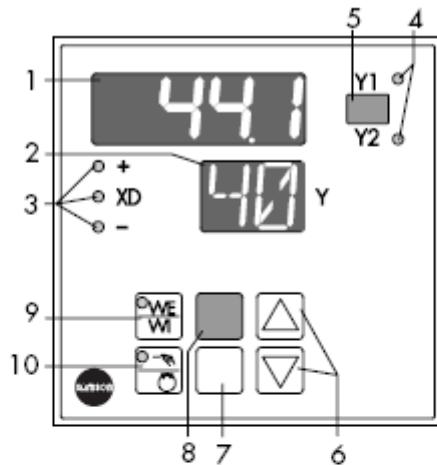
4.1.2.2. EL REGULADOR INDUSTRIAL UTILIZADO

El regulador industrial utilizado es un Trovis 6496 del fabricante SAMSON. Está basado en microprocesador con concepción flexible del software para la automatización de instalaciones industriales y de procesos. Se puede utilizar tanto en bucles de regulación sencillos como para solucionar problemas complejos de regulación.

El software está concebido, como se ha comentado, de forma flexible para que puedan ser configurados todos los bucles de regulación normales, sin necesidad de modificar el hardware. Esto se consigue gracias a disponer de bloques de función memorizados, que pueden adaptarse a la configuración específica de la instalación.

Las características de este regulador son las siguientes:

- Indicación frontal con dos displays digitales (LED, rojo). En funcionamiento normal indican la magnitud de regulación X y la magnitud de mando Y.
- Manejo frontal y configuración por medio de únicamente 6 pulsadores.
- Entrada seleccionable para termómetro de resistencia Pt 100, potenciómetro, cuatro distintos termopares o señales analógicas 4(0)...20 mA ó 0(2)...10 V.
- Conexión para transmisores en técnica de dos hilos.
- Comutación automático/manual y viceversa sin choques.
- Todos los datos y parámetros están protegidos contra fallos de tensión en una memoria no volátil (EEPROM)
- Sellado total del teclado a base de película. Clase de protección frontal: IP 54
- Indicación opcional en °C o en °F.
- Auto-tunning.
- En el regulador TROVIS 6496-03 puede seleccionarse la señal de salida entre continua-analógica, todo-nada (dos puntos) o de tres puntos.



- 1 Display digital LED con signo $+$ / $-$, en servicio normal indica la magnitud X
- 2 Display digital LED, en servicio normal indica la magnitud Y
- 3 Indicación de la diferencia de regulación
- 4 Indicación de contactos de salida tres puntos, dos puntos, alarma
- 5 Placa indicadora de la unidad física
- 6 Pulsadores-cursor
- 7 Pulsador de proceso
- 8 Pulsador de confirmación
- 9 Conmutador consigna ext. (WE)/int. (WI)
- 10 Conmutador manual/automático

Figura 13: Panel frontal del Trovis 6496

El manejo se distribuye en tres niveles:

- Nivel de proceso
- Nivel de parámetros
- Nivel de configuración

Los niveles de parámetros y de configuración están protegidos contra el acceso involuntario o no autorizado por medio de un código de entrada seleccionable por el operador.

Nivel de proceso

En funcionamiento normal se encuentra el regulador en el nivel de proceso. El display digital LED (1) indica la magnitud de regulación X y el display digital LED (2) la magnitud de mando Y. Las demás magnitudes se seleccionan apretando el pulsador de proceso (7). Por defecto, cuando el regulador esté trabajando, mostrará este estado de funcionamiento.

Nivel de parámetros

Para acceder al nivel de parámetros hay que introducir un código de seguridad. Mediante los pulsadores-cursor (6) se determinan numéricamente los parámetros, cuyos valores aparecen

en el display digital (1). La descripción de los parámetros, como por ejemplo el coeficiente de acción proporcional K_p , tiempo de acción integral T_N , etc. Son ejemplos de parámetros configurables en este menú, y se indican en el display digital LED (2).

Nivel de configuración

Este nivel está también protegido por medio de un código de entrada. Con los pulsadores-cursor pueden seleccionarse a voluntad los diferentes bloques de configuración. Estos aparecen en el display digital LED (2). En este menú se podrá seleccionar, entre otras cosas, el tipo de unidades de ingeniería que se mostrará por el display, o modificar los códigos de seguridad.

(SAMSON 2004)

4.2. EL SOFTWARE

Principalmente, en el proyecto se utilizarán dos paquetes de software industrial. Por un lado, el SIMATIC, de la marca SIEMENS, permitirá programar el PLC, configurar la red PROFIBUS, y configurar los componentes activos de la red (PLC y PC). Por otro lado, el software InTouch, de la marca WONDERWARE, permitirá realizar el interfaz del sistema SCADA, y también ayudará a realizar un enlace de comunicación entre la información del PC (proveniente del PLC) y la aplicación de supervisión.

4.2.1. SOFTWARE SIMATIC (SIEMENS)

El Software Industrial SIMATIC es un sistema de herramientas software perfectamente indicado para los sistemas de automatización SIMATIC S7 / C7 / WinAC. Está basado en estándares, es homogéneo e incrementa la productividad.

A la hora de programar y configurar el PLC, se ha trabajado con Step7, orientado a la programación de bloques de funciones y de datos. La idea es tener un bloque de organización principal (OB1) que se ejecuta cíclicamente cada x milisegundos. Desde aquí se hacen las llamadas a los bloques de función y se realizan los accesos pertinentes a los bloques de datos, a fin de dotar al programa de la funcionalidad que se desea.

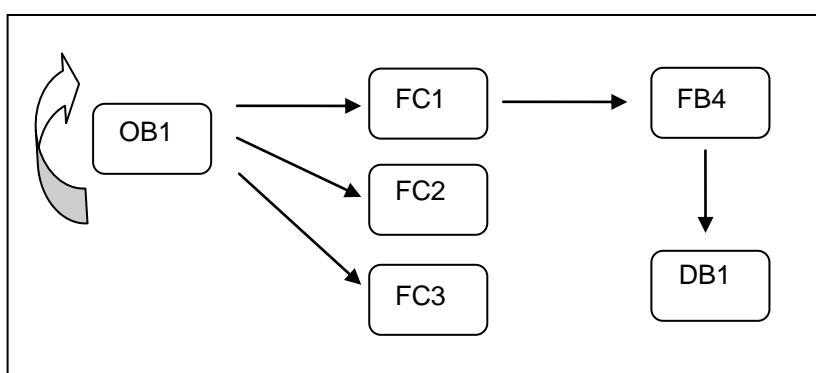


Figura 14: Ejemplo de ejecución por bloques. OB: Bloque de Organización; FC: Funciones; DB: Bloque de datos.

Dentro del Step7 se ha utilizado un lenguaje de bajo nivel similar al ensamblador (lenguaje a nivel de máquina), denominado AWL, mediante el cual se han programado todas las funciones y los bloques de organización (éstos siempre son de ejecución cíclica). Este lenguaje trabaja con etiquetas, saltos, acumuladores, etc., y permite funcionalidades que un lenguaje de contactos simple no proporciona. Un ejemplo puede ser el hecho de manipular tipos de datos a nuestro parecer, como los enteros, los flotantes, redondear reales, truncarlos, etc., dando el grado de libertad necesario para hacer cálculos con variables captadas y tratadas⁸ por el PLC.

Por otro lado, se ha utilizado el paquete SIMATIC NET para configurar la comunicación del PC con el PLC. Este software requiere de una tarjeta de adquisición de datos (CP5611 en este proyecto) que hace posible la comunicación entre estos dos dispositivos. Así, se define SIMATIC NET como un software de ayuda a la configuración del PC a fin de comunicarlo, en nuestro caso, a una red PROFIBUS. También posee una herramienta de creación de un servidor OPC, necesario para hacer llegar los datos que se reciben del PLC con el programa poseedor de la interfaz gráfica del sistema SCADA (cliente OPC). En los apartados siguientes se analizará con más detalle el tipo de comunicación (cliente – servidor) que se realiza dentro del PC. (SIEMENS, www.automation.siemens.com s.f.)

4.2.2. SOFTWARE WONDERWARE INTOUCH

Wonderware ofrece mediante InTouch la posibilidad de generar aplicaciones SCADA al más alto nivel, utilizando las herramientas de programación orientadas a objetos, para usuarios no informáticos. Seguidamente se analizarán las características más significativas, así como sus prestaciones, que hacen de esta marca un software puntero en la informática industrial.

Gráficos orientados a objetos: Las aplicaciones son fáciles de editar y configurar, por lo que representan un menor tiempo de desarrollo. Se puede mover, redimensionar y animar objetos o grupos de ellos como si fueran imágenes estáticas. Dispone de todo tipo de herramientas de diseño: dibujos sencillos, alineación, trabajo en múltiples capas, espaciado, rotación, inversión, duplicación, copia, eliminación, etc.

SuitLink / OPC: Es un protocolo de comunicaciones elaborado por Wonderware de muy altas prestaciones para enlace de aplicaciones bajo TCP/IP o PROFIBUS, en el que se pueden configurar clientes OPC.

Gráficos de Tendencia Históricos y a Tiempo Real: Cada gráfico puede presentar hasta 16 plumas con referencias a variables y ficheros históricos independientes. Cada uno de los gráficos dispone, en tiempo de ejecución, de selección de variables, visualización del valor en la posición del cursor, ampliación, desplazamiento o centrado.

⁸ Las entradas analógicas, por ejemplo, son leídas por el PLC en formato Word. Así pues habrá que tratarlas para convertirlas en Reales y ser posteriormente operadas.

Alarms: Permite configurar y establecer prioridades de alarmas rápidamente. Hasta 999 prioridades diferentes, cambios de color de acuerdo con el estado de la alarma y hasta 8 niveles de jerarquía entre grupos de alarma con posibilidad de hasta 16 subgrupos para cada uno de ellos.

Programación: Posee un lenguaje de programación sencillo y extenso para la realización de cálculos en segundo plano, simulaciones, etc.

Lecturas y escrituras optimizadas: El uso de técnicas de excepción en lecturas/escrituras de variables enlazadas a segundas aplicaciones facilita la transferencia de datos de la forma más rápida. Sólo se actualizan continuamente los puntos de comunicación de objetos visibles o los utilizados en alarmas, históricos o en programas de usuario.

(LOGITEK s.f.)

4.3. COMUNICACIÓN

En este apartado veremos los aspectos de comunicación más significativos que se han tenido en cuenta para poder configurar cada elemento que interviene. Se distinguen dos niveles de comunicación:

- **Nivel de campo:** Comunicación en tiempo real que se realizará mediante PROFIBUS-DP e intervendrá el PLC y los actuadores inteligentes (variadores de frecuencia para actuar sobre las bombas 1 y 2).
- **Nivel de supervisión:** Comunicación en tiempo real que se realizará mediante PROFIBUS-DP e intervendrán el PLC y el PC de supervisión.

4.3.1. NIVEL DE CAMPO

A nivel de campo, se tendrá que realizar la comunicación entre el PLC y los variadores de frecuencia Danfoss VLT2800, con el objetivo de gobernar los actuadores inteligentes mediante el controlador a partir del puerto PROFIBUS-DP que éste último posee.

Primeramente se tiene que comprender el tipo de comunicación (PPO) que se tiene que llevar a cabo para que ambos componentes se entiendan. A continuación se verá cómo se ha realizado la configuración de ambos.

4.3.1.1. DESCRIPCIÓN DEL PPO

La transferencia de datos entre el maestro y el esclavo de PROFIBUS-DP tiene lugar a través del campo de datos de entrada/salida (ver figura 15). El maestro escribe en los datos de salida hacia el esclavo y el esclavo responde enviando el contenido de sus datos de entrada al maestro. El contenido de los datos de entrada/salida se define en el perfil del dispositivo. El perfil del dispositivo para variadores de frecuencia es PROFIDRIVE.

El VLT2800 puede controlarse mediante el maestro de PROFIBUS-DP utilizando los tipos PPO definidos en PROFIDRIVE. Cuando el bus de campo se ha seleccionado como el lugar de control activo del variador de frecuencia, el funcionamiento de éste puede controlarse desde el maestro de PROFIBUS-DP. Tanto si el lugar de control activo es el bus de campo como si no lo es, el variador se puede monitorizar y sus parámetros se pueden establecer desde el maestro.

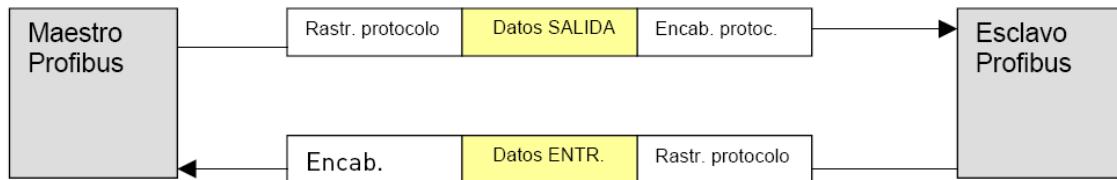


Figura 15: Transferencia de datos entre los maestros y esclavos PROFIBUS

Un PPO es un objeto parámetro de proceso. Se adapta bien a transferencias de datos cíclicas, y puede transportar, como su nombre indica, datos de proceso y parámetros. Los primeros se emplean para leer y/o actualizar los parámetros uno por otro. Los segundos consisten en una parte fija (4 bytes) y en una parte de parámetros (8 o 16 bytes). En la parte fija se transfiere el código de control (CTW o STW) y la referencia de velocidad (MRV o MAV). En la parte de parámetros, el usuario elige cuáles deben transferirse.

Existen 5 tipos de PPO a elegir en función de la operatividad que queramos darle al maestro de PROFIBUS-DP para que controle el variador. Los tipos 1, 2 y 5 están compuestos de la parte de parámetro y de datos de proceso de 4, 12 y 20 bytes respectivamente. Los tipos 3 y 4 están compuestos de datos de proceso de 4 y 12 bytes respectivamente.

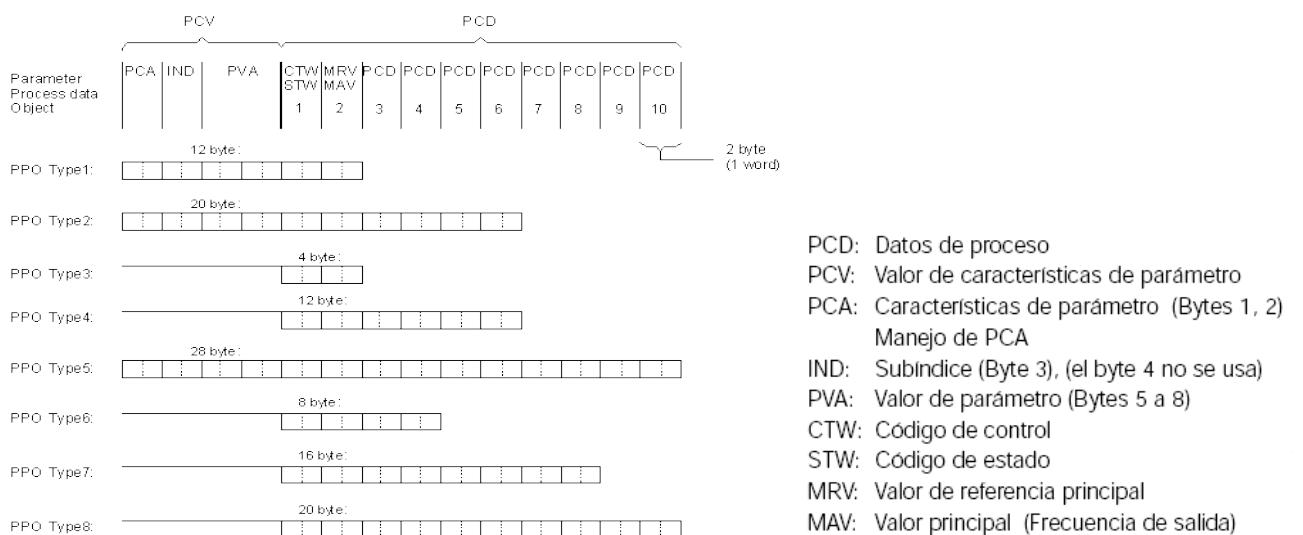


Figura 16: Tipos de PPO. Notación del fabricante Danfoss

El PPO que se utilizará en el proyecto será el PPO type3, compuesto únicamente por la parte fija (CTW o STW, y MRV o MAV). La elección se ha realizado en función de la tarea que desempeñará el variador. En el capítulo 4.3 se explicará que el PLC utiliza el variador para

mandar una referencia de velocidad de giro de motor de una bomba peristáltica. Así pues, con la parte fija ya tenemos suficiente. En este punto hace falta saber, únicamente, qué código de control será válido para realizar dicha tarea.

El fabricante Danfoss proporciona, en su documentación técnica, la tabla siguiente que permite conocer el código de control necesario para cada requerimiento. La metodología para encontrarlo es simple: utiliza 16 bits, los cuales poseen significado propio si se ponen a 0 o a 1, todo construyendo 2 bytes en hexadecimal. Estos bytes serán el código de control resultante a enviar por el maestro PROFIBUS-DP.

Código de control				
Según código de control PROFIDRIVE (parám. 512=0)		Según estándar VLT (parám. 512=1)		
Bit	Bit = 0	Bit = 1	Bit = 0	Bit = 1
00 (LSB)	NO 1	Sí 1	Ref. interna	
01	NO 2	Sí 2		
02	NO 3	Sí 3	Freno de CC	Rampa
03	Marcha por inercia	Sí	Marcha por inercia	Activada
04	Parada rápida	Rampa	Parada rápida	Rampa
05	Mantener freq. de salida	Rampa activ.	Mantener salida	Rampa activ.
06	Parada de rampa	Arranque	Parada de rampa	Arranque
07	Sin función	Reset	Sin función	Reset
08	Vel. fija 1 NO	Sí	Sin función	Vel. fija
09	Vel. fija 2 NO	Sí		
10	Dato no válido	Valido	Dato no válido	Válido
11	Sin función	Deceler.	Sin función	
12	Sin función	Enganche	Sin función	
13	Selecc. de ajuste		Selecc. de ajuste	
14				
15 (MSB)	Sin función	Inversión	Sin función	Inversión

Tabla 2: Código de control VLT2800

La introducción de la referencia de velocidad también se realizará de la misma manera, mediante dos bytes en hexadecimal, en un rango de 0000h-4000h.

(Danfoss s.f.)

4.3.1.2. CONFIGURACIÓN DEL PLC

Antes de enviar al esclavo la información anteriormente encontrada, se tendrá que realizar la configuración del PLC. Ésta se hará desde el software Step7 que, como ya se ha visto, sirve tanto para programar como para configurar. Los pasos a seguir son los siguientes:

1. Instalar el archivo GSD.

Un archivo GSD (Generic Station Description) es proporcionado por el fabricante del dispositivo, y contiene una descripción de las características PROFIBUS DP de éste, que el maestro debe conocer para realizar la comunicación.

Tal y como se ve en la figura, desde el software SIMATIC Manager, se clica sobre *Hardware* y se abre la aplicación.

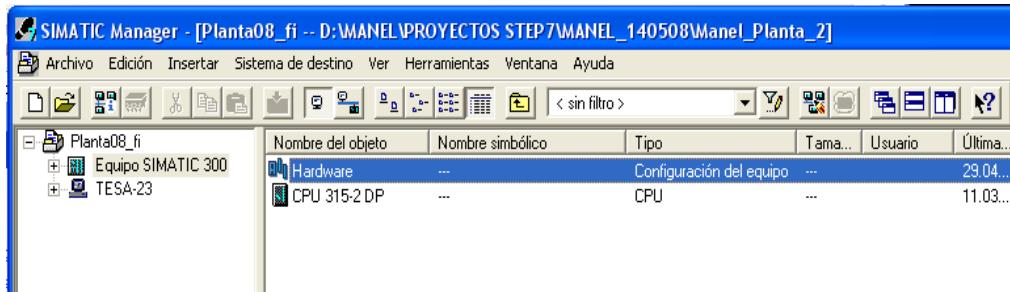


Figura 17: Se muestra la ventana: STATION Manager → Equipo SIMATIC 300

Se abre la ventana de configuración y se procede a instalar el archivo tal y como se muestra en la siguiente figura.

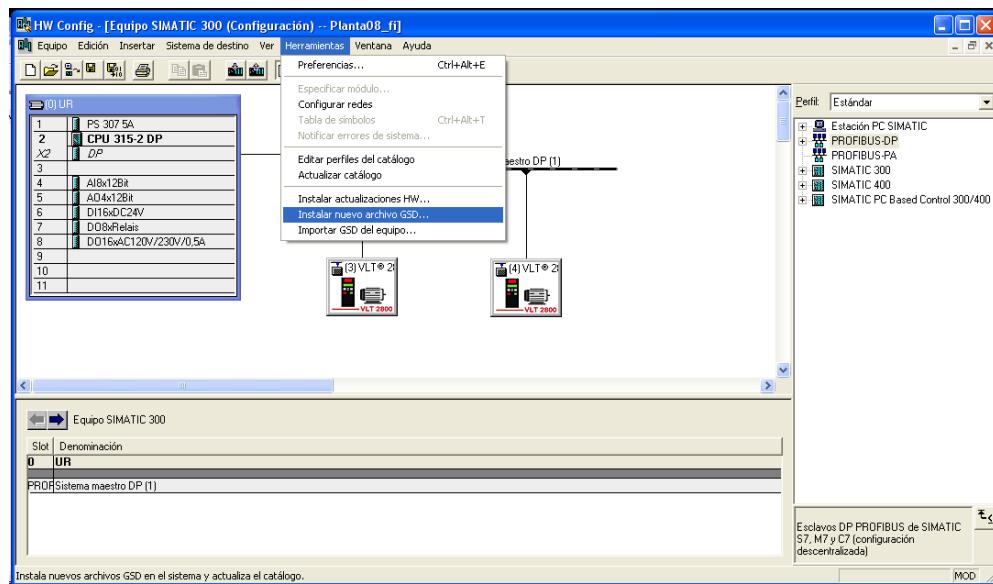


Figura 18: Ventana correspondiente a la aplicación HW Config

Una vez indicada la ruta donde está ubicado el archivo GSD, el programa lo instala y lo ubica en el catálogo de hardware (figura 19), dejándolo listo para utilizar.

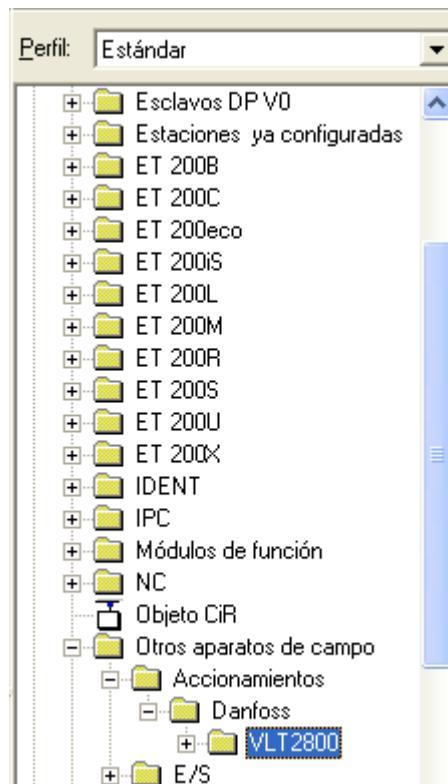


Figura 19: Catálogo Hardware

2. Crear la red e insertar en ella los variadores de frecuencia VLT2800.

La red se crea haciendo clic con el botón derecho encima del bastidor *DP*, seguido de *Insertar Sistema Maestro*. Aparecerá un hilo simbolizando la red PROFIBUS, del cual colgaremos los esclavos. Haciendo doble clic encima de éste se podrán configurar las características de la red (figura 20). Las más importantes son el identificador de la red y la velocidad de transmisión, ya que la primera tendrá que ser única y la segunda se tendrá que tener en cuenta para configurar otros aparatos de la red (la velocidad será la misma para todos los componentes).

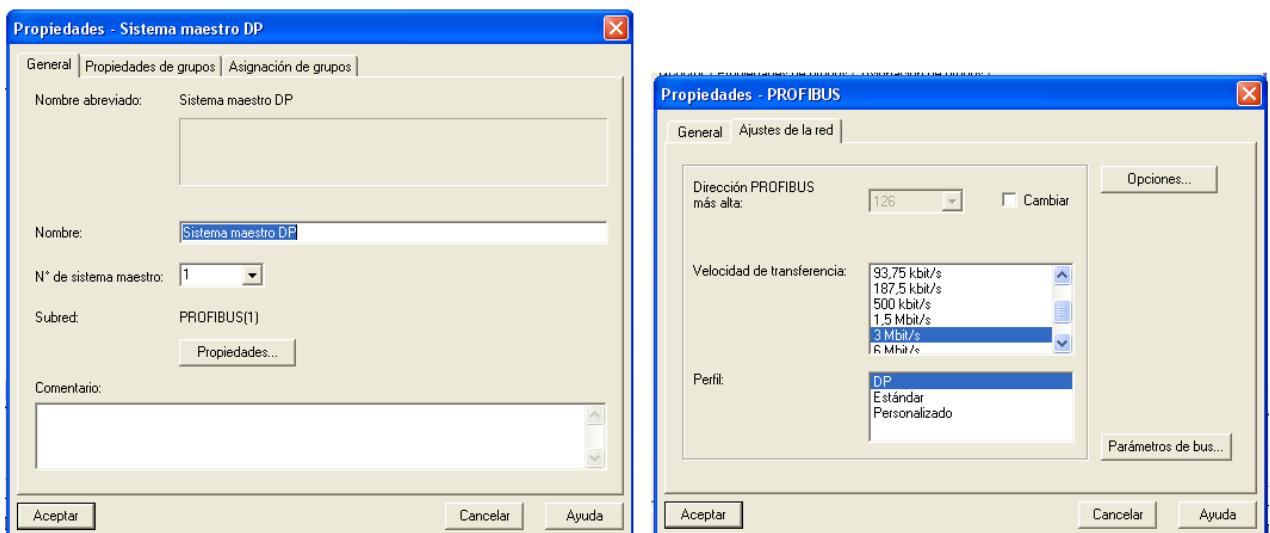


Figura 20: El cuadro de diálogo de la izquierda aparece haciendo doble clic en el hilo de la red, y se podrá configurar el identificador único del maestro DP. Clicando encima de la pestaña *Propiedades* aparece el segundo cuadro (pestaña *Ajuste de Red*), en el cual se podrá configurar la velocidad de la red y el perfil DP.

Una vez creada la red, desde el *catálogo de hardware* (figura 19), se arrastra el archivo instalado anteriormente y se cuelga del hilo de la red, quedando los esclavos tal y como se observa en la figura 18 o en la 21. En este momento habrá que asignarles el identificador único a los esclavos, en nuestro caso será el 3 y el 4.

3. Escoger el tipo de PPO.

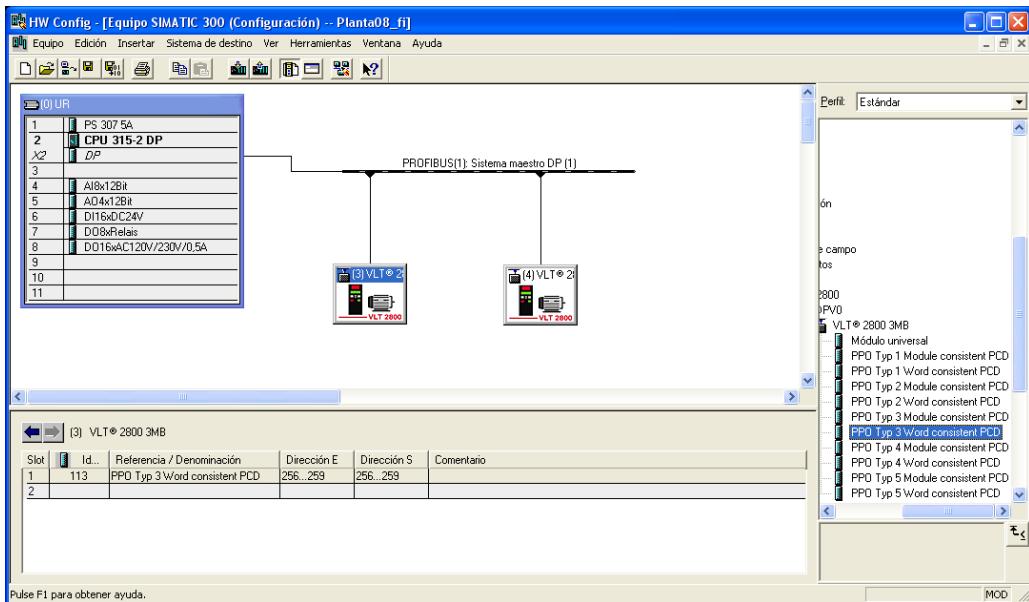


Figura 21: Configuración PPO type3

Se escoge instalar *PPO type3 Word consistent PCD* porque permite mayor flexibilidad a la hora de configurar las direcciones de escritura y lectura de las palabras a transferir. Con la opción de *Module Consistent* también funcionaría.

Viendo la imagen anterior, el procedimiento consiste en arrastrar el tipo de PPO elegido hasta el slot 1 del VLT2800 (parte inferior de la ventana). Automáticamente el programa te asigna la dirección de las dos palabras de entrada y salida.

Una vez realizada la configuración, se carga en el PLC y, a nivel de programación, sólo habrá que escribir cada palabra con el valor explicado anteriormente.

(SIEMENS, www.automation.siemens.com s.f.)

4.3.1.3. CONFIGURACIÓN DE LOS VARIADORES DANFOSS VLT2800

Los VLT2800 se configuran mediante los botones y el display que poseen. A nivel de configuración PROFIBUS, se distinguen una serie de parámetros importantes a modificar. Seguidamente se mostrarán cuáles son y qué significado tienen.

Parámetros de acceso al bus

Los parámetros comprendidos entre el 502 y el 508 tienen que tener el valor [3]. Esto significa que el variador de frecuencia podrá ser manipulado, bien por entradas digitales o bien por el bus. El valor [1] también es correcto, ya que significa que sólo el bus puede variar el comportamiento del VLT2800. El parámetro 512 servirá para indicar el protocolo utilizado en el código de control.

Parámetros específicos de PROFIBUS

Éstos serán los comprendidos entre el 800 y el 970. Su significado se refleja en la tabla siguiente:

Parámetros PROFIBUS		
800	Selección de protocolo	[1]DP
803	Tiempo de BUS	1 Seg
804	Función tiempo de BUS	[0]No
805	Función del bit 10 del código de control	[1]Bit 10 = 1 CTW activo
904	Tipo de PPO para DP	902 (tipo 3, 4 bytes)
917	Activar mensajes espontáneos	[0]No
918	Dirección de estación en bus	3 y 4
970	Editar ajuste seleccionado	[5]Ajuste activo
971	Almacenar valores de datos	[0]Sin acción

Tabla 3: Parámetros PROFIBUS a configurar en el VLT2800

Con esta configuración, PLC y VLT 2800 ya comunican. Es importante ver que en el variador de frecuencia no hay que configurar la velocidad de transferencia del bus, ya que la detecta automáticamente a partir del maestro.

(Danfoss s.f.)

4.3.1.4. CABLE UTILIZADO

Para terminar de explicar la comunicación a nivel de campo, seguidamente se verá el cable utilizado para comunicar el PLC y los variadores. Tal y como se ha explicado en el capítulo

anterior, PROFIBUS es un bus serie que utiliza el protocolo RS-485. Sin embargo, existen muchas variantes en función del hardware implicado.

Por un lado, la tarjeta PROFIBUS de los VLT2800 se conecta a la línea de bus por medio de los terminales 68 (línea positiva) y 69 (línea negativa) tal y como se muestra en la siguiente figura.

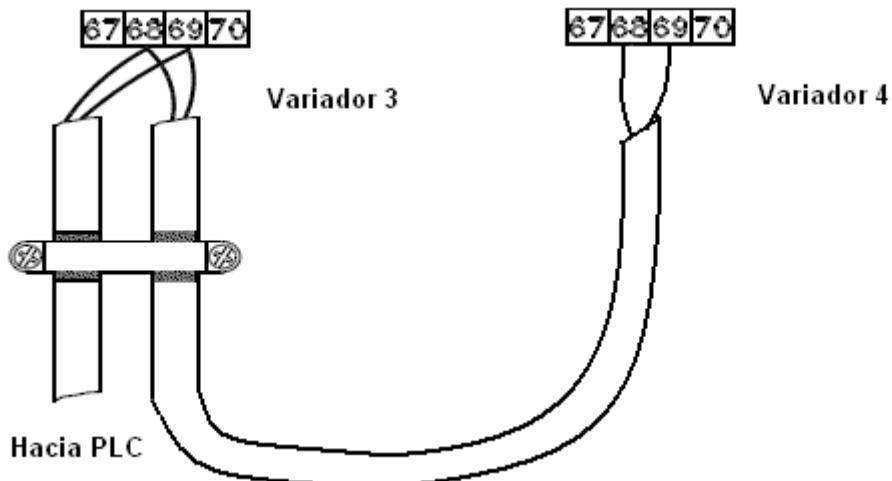


Figura 22: Esquema de conexión de los VLT2800 a la red profibus.

Por otro lado, el PLC se conecta a la línea de bus mediante un conector sub-D de 9 pines, de los cuales sólo conectaremos los dos hilos de comunicación que necesitan los variadores de frecuencia, es decir, en el pin 3 la línea positiva y en el 8 la negativa.

Así pues, con un cable apantallado de dos hilos, en el que en un extremo tenga un conector sub-D de 9 pines con el 3 y el 8 conectados, y en el otro conectemos los dos hilos tal como muestra la figura anterior, ya tendríamos la conexión correcta.

Ahora bien, realizar una conexión física PROFIBUS en entornos industriales no resulta tan simple. Hay que tener en cuenta factores de distancia (afectará a la velocidad), de ruido electromagnético (afectará directamente a la comunicación, habría que utilizar resistencias terminadoras al inicio y final de la topología de la red), entre otras recomendaciones que el fabricante nos expone en el manual del dispositivo.

(SIEMENS, www.automation.siemens.com s.f.) (Danfoss s.f.)

4.3.2. NIVEL DE SUPERVISIÓN

En la realización de toda comunicación, como en la anterior, se pueden distinguir dos niveles: uno físico y otro de configuración del software. Se ha decidido separar claramente éstos debido al elevado volumen de información que se tratará, desde tarjetas PCI hasta una gran variedad de software configurable.

El objetivo de esta comunicación será aprovechar la red PROFIBUS, existente a nivel de campo, para comunicar el PC con el PLC a fin de supervisar el proceso productivo.

4.3.2.1. ASPECTOS FÍSICOS

A nivel físico, la comunicación corresponde al protocolo PROFIBUS-DP, en el que el PC se incorporará a la red como maestro, y el PLC seguirá tal cual se configuró en el apartado anterior. Seguidamente se muestran los elementos físicos imprescindibles que intervienen.

4.3.2.1.1. CONECTOR PROFIBUS PARA PLC DE SIEMENS (6ES7 972-0BB50-0XA0)

El conector utilizado forma parte de la suite de productos PROFIBUS ofrecida por SIEMENS a fin de garantizar el correcto funcionamiento de la comunicación y así, prevenir posibles problemas. Las características principales de este conector son las siguientes:

- Posee interface para PC (Salida con conector sub-D de 9 pines).
- Dos conexiones simples (de dos hilos) con salida de 90°.
- Resistencias terminadoras activables mediante un selector.



Figura 23: Conector SIEMENS con referencia 6es7 972-0bb50-0xa0

4.4.2.1.2. CABLE PROFIBUS

A diferencia del cable PROFIBUS utilizado a nivel de campo, éste utiliza, aparte de los dos hilos de comunicación, tres más, distribuidos de la siguiente manera:

NºPin	Abreviatura	Significado	Input/output (visto desde PC)
1	NC	Pin 1 está sin conectar	-
2	NC	Pin 2 está sin conectar	-
3	LTG_B	Línea B de la señal de datos	I/O
4	RTSAS	Esta señal de control se activa a '1' cuando el PLC está enviando	I
5	M5EXT	Línea de retorno (GND) del subministro de 5V	O
6	P5EXT	Subministra 5V	-

7	NC	Pin 7 sin conectar	-
8	LTG_A	Línea A de la señal de datos	I/O
9	RTS	Esta señal de control se activa a '1' cuando el PC esta enviando	O

Tabla 4: Distribución de los pines en cable de comunicación PC-PLC

En ambos cabezales del cable habrá que introducir un conector sub-D de 9 pines con la distribución anterior.

(SIMATIC NET, Instalation instructions CP5611)

4.3.2.1.3. TARJETA CP5611 DE SIEMENS

El único componente físico que falta para realizar la comunicación a nivel de supervisión (aparte del PC y el PLC) es la tarjeta de adquisición de datos CP5611. Ésta servirá para que el PC pueda comunicarse con la red PROFIBUS, y así solicitar al PLC los datos a supervisar por la aplicación SCADA, implementada en el mismo ordenador.



Figura 24: Tarjeta PCI CP5611 de SIEMENS

Realizará dos tareas importantes: en primer lugar, tendrá que interpretar el protocolo de comunicación S7 cuando el servidor OPC le solicite algún valor; una vez interpretado tendrá que enviar la solicitud al PLC mediante una red PROFIBUS-DP y viceversa.

Las características principales de esta tarjeta son:

- Se conecta al ordenador a través del bus PCI
- Soporta las interfaces de comunicación PROFIBUS (hasta 12 Mbits/s) y MPI
- Puede ser maestro PROFIBUS-DP Clase 1 y 2
- Puede ser esclavo PROFIBUS-DP
- Soporta comunicación con PC/PG
- Soporta comunicación S7
- Compatibilidad con comunicación S5

4.3.2.2. ASPECTOS SOFTWARE

A nivel de configuración del software, el objetivo será comunicar ambos dispositivos mediante el protocolo S7, propio de SIEMENS SIMATIC Step7. Mediante este protocolo se podrá acceder a los bloques de datos, a los timers, a la periferia,... de la misma manera que si se estuviera programando el PLC.

Una vez logrado el acceso a las variables, se creará una comunicación OPC, así como un acces name, propio de InTouch, que permita asociar las variables del PLC a los Tags de la aplicación SCADA creada.

4.3.2.2.1. TECNOLOGÍA OPC (OLE/COM FOR PROCESS CONTROL)

Los procesos de modernización en los sistemas productivos, normalmente involucran la necesidad de la adquisición de aplicaciones SCADA que habitualmente "amarran" a una empresa con un solo fabricante, pues lo que normalmente se ofrece es una "solución llave en mano" o en paquete en la que el mismo fabricante del hardware industrial ofrece el software para comunicarse con los equipos y para llevar a cabo la integración, la supervisión y el control. Una solución así suele ser muy costosa, y dificulta la integración de tecnologías de diferentes proveedores, o de equipos nuevos y viejos.

Otro problema común de los sistemas SCADA es que no cumplen con todos los requerimientos que una empresa necesita, o por el contrario están sobredimensionados para lo que el usuario final requiere realmente, haciendo que este pague una gran suma de dinero por una cantidad de funcionalidades que nunca usará.

Una solución a estos problemas sería el desarrollo de sistemas de supervisión y control propios, pero cuando se desarrollan aplicaciones distribuidas en ambientes industriales usando tecnologías tradicionales de programación, se encuentran problemas difíciles de sortear, debido a que cada fabricante ha creado de manera independiente sus propias aplicaciones para que los sistemas informáticos se comuniquen con sus equipos industriales y a que, en general, el software y el hardware desarrollados por un fabricante no son fáciles de integrar con los de otro, pues no están obligados a hacer desarrollos compatibles con los desarrollos de la competencia.

Es común también que un fabricante receloso de su propiedad intelectual, simplemente no revele los detalles de funcionamiento de sus equipos, dificultando con esto aun más el diseño de soluciones de automatización de plantas donde hay equipos de diferentes proveedores.

Como una respuesta a estos problemas se propone la utilización del estándar OPC (OLE/COM for Process Control) una tecnología de protocolos de alto nivel para el desarrollo de aplicaciones de software interoperable en sistemas distribuidos, para la supervisión y control en plantas industriales. Este hecho da cabida a que equipos de diferentes fabricantes puedan trabajar sin que se presenten conflictos entre ellos y facilitando el que cada empresa cree aplicaciones de medición y control hechas a su medida, sin tener que depender de una sola

casa fabricante de equipos y sin tener que pagar los altos costos que implica el licenciamiento de software industrial.

Así pues, este tipo de tecnología se adecúa perfectamente a las necesidades de este proyecto, puesto que se dispone de dos marcas distintas: SIEMENS y LOGITEK. Como ya se ha comentado anteriormente, la primera trabaja a nivel de campo (programación PLC y configuración de la red de campo), y la segunda corresponde al software industrial de supervisión. Para enlazar ambos fabricantes se utilizará la comunicación OPC, expuesta a continuación desde un punto de vista más técnico.

(Diego Lemos, Miranda Guerrero y Arias 2006)

4.3.2.2.1.1. FUNCIONAMIENTO DEL OPC

OPC se basa en las tecnologías de Microsoft OLE/COM (Object Linking and Embedding / Component Object Model). Constituye una arquitectura Cliente-Servidor, proporcionando una buena plataforma para extraer datos de una fuente (i.e. PLC), ya que a partir de un servidor OPC se pueden comunicar los datos a cualquier aplicación cliente de manera estándar (OPC Overview 1998), esté en la misma máquina o en otra dentro de una red, independientemente del tipo que ésta sea.

La idea de comunicación OPC en el proyecto, una vez conectados los elementos físicamente tal como se ha explicado anteriormente, es la de tener el servidor y el cliente en la misma máquina, en el PC de la planta. El servidor se creará con el software de SIEMENS SIMATIC NET, el cual permitirá utilizar el protocolo de comunicación S7, el mismo que utiliza el PLC, para solicitar los datos requeridos. Una vez se tiene el servidor implementado, se pueden crear tantos clientes como aplicaciones necesiten el acceso a los datos del servidor. En el proyecto sólo se tendrá un cliente, la aplicación software SCADA realizada mediante InTouch.

Resumiendo, mediante la tecnología OPC se ha podido realizar la supervisión del proceso de la planta con otro fabricante al utilizado en el control. A nivel visual, el esquema siguiente ayuda a entender la idea de la implementación de la tecnología OPC en el proyecto.

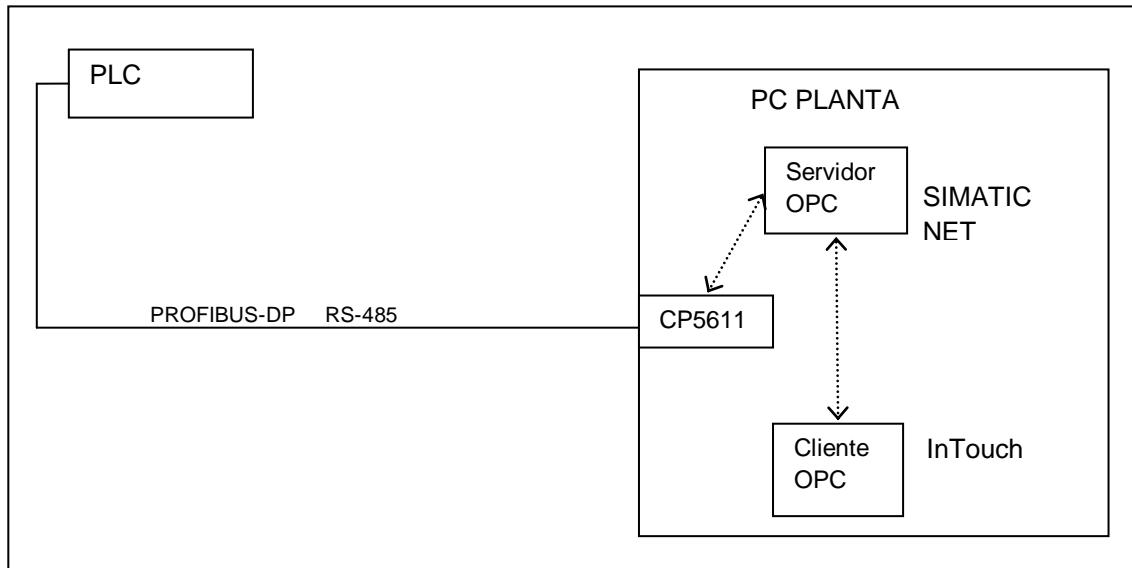


Figura 25: Esquema del funcionamiento de la comunicación OPC, mediante la cual se une el software SIMATIC NET de SIEMENS e InTouch de WONDERWARE

4.3.2.2.2. CONFIGURACIÓN DEL SOFTWARE

Para realizar la comunicación descrita en el esquema anterior, será necesario configurar una serie de aplicaciones software. Primeramente se empezará por el proyecto Step7 (donde está descrita la configuración del PLC y su programación), mediante el cual se configurará el PC como un elemento de la red (y del proyecto) que se comunicará mediante la tarjeta CP5611 y que contendrá un servidor OPC. Una vez realizado, se procederá a la creación del servidor, mediante el software Station Configurator y OPC Scout, para acabar creando el enlace entre éste y el cliente con el OPC link, mediante el cual se creará el acces name⁹.

4.3.2.2.2.1. PROYECTO STEP7

Esta configuración servirá para:

- Introducir el PC en el proyecto Step7.
- Evitar incongruencias en la configuración de la red global (i.e. esclavos sin maestros, o un servidor OPC sin asociar a ningún controlador).
- Especificar cómo se conectará el PC a la red.
- Saber qué hará el PC en el proyecto.

Se dividirá la configuración total en los siguientes pasos:

1. Agregar PC en el proyecto Step7

⁹ Configuración del los enlaces OPC mediante el cual InTouch solicita y recibe los valores de las variables de la aplicación SCADA

Se abre la aplicación SIMATIC Manager y clicando encima del nombre del proyecto (Planta08_fi), en la parte derecha aparecerán todos los elementos que intervienen y las redes de comunicación implementadas.

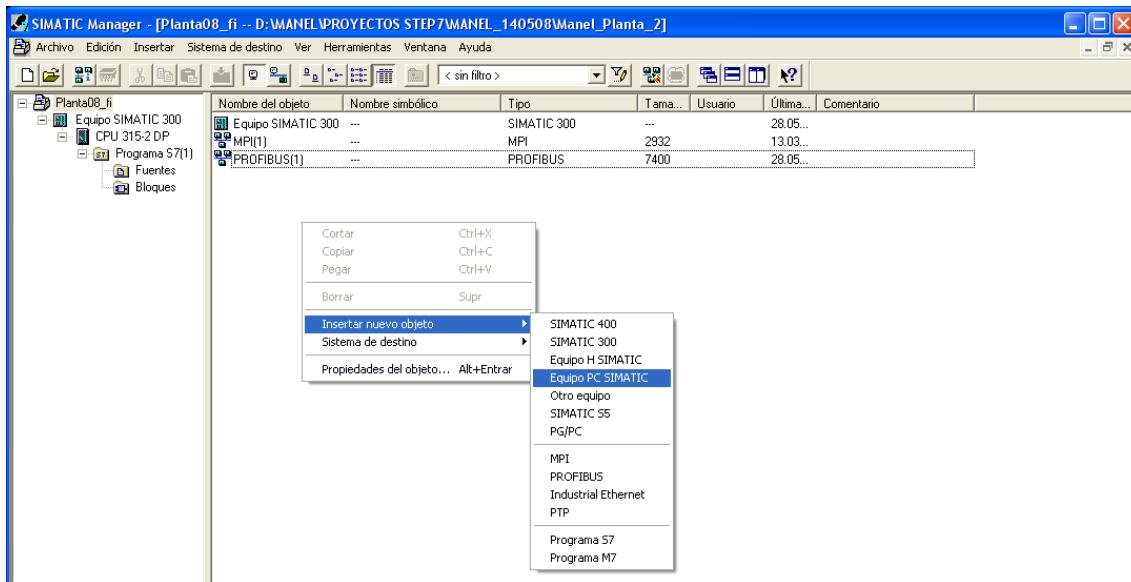


Figura 26: Agregación de un PC dentro de un proyecto de Step7

Con el cursor encima de la ventana grande de la derecha, se realiza un clic con el botón derecho del ratón. Aparece un menú en el que se seleccionará *Insertar nuevo objeto*, seguidamente de *Equipo PC SIMATIC*. Aparecerá el elemento nuevo de la siguiente manera:

Nombre del objeto	Nombre simbólico	Tipo	Tama...	Usuario	Última...
Equipo SIMATIC 300	...	SIMATIC 300	28.05...
PG/PC(1)	...	PG/PC	1208	...	28.05...
MPI(1)	...	MPI	2932	...	13.03...
PROFIBUS(1)	...	PROFIBUS	7400	...	28.05...

Figura 27: Ya se ha insertado el PC en el proyecto. Hay que renombrarlo.

Se cambiará el nombre del PC, en este caso “PLANTA-73-209”.

2. Configurar PC

Dentro del elemento creado, se hará doble clic en Configuración y aparecerá la siguiente pantalla:

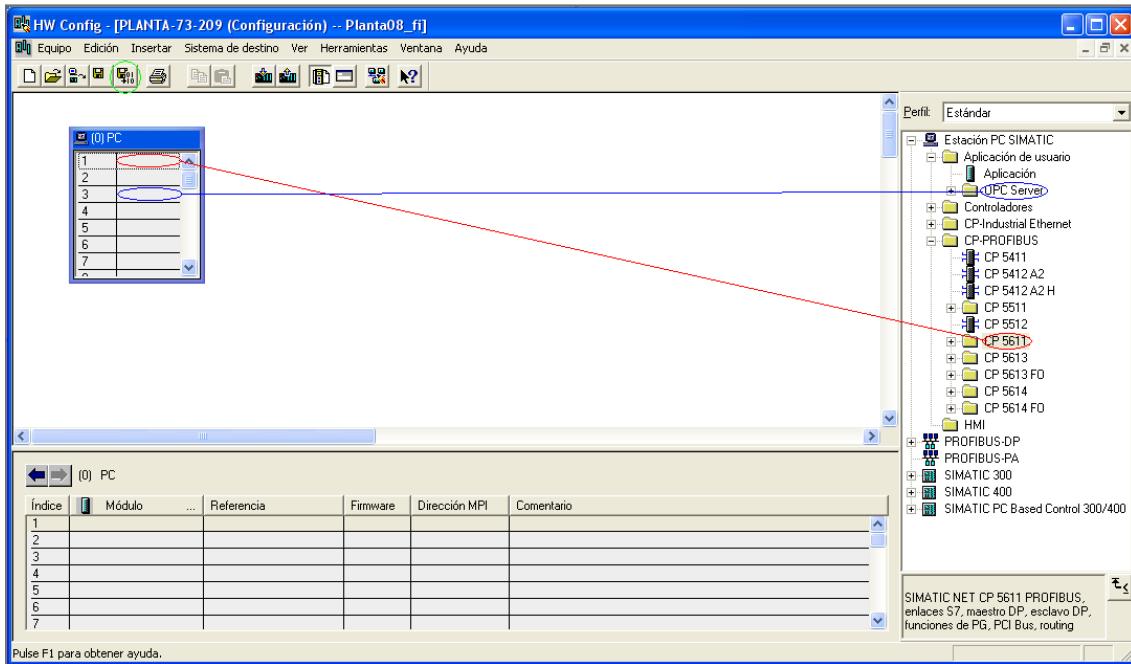


Figura 28: Ventana de configuración del PC

Seguidamente se tendrán que agregar los elementos que dispondrá el PC. Por un lado, el elemento físico, tal y como se ha comentado, es la tarjeta de comunicación CP5611, que se arrastrará hasta un bastidor libre. En la figura se ha indicado en color rojo esta acción. Una vez colocada la tarjeta, aparecerá una ventana en la que se indicará que el elemento pertenece a la red PROFIBUS existente en el proyecto, y la dirección única que tendrá dentro la red.

Por otro lado, el elemento funcional del PC será el servidor OPC, así que se procede de la misma manera (la acción está representada en color azul). En este caso, la configuración por defecto ya será correcta.

Una vez realizadas estas acciones, se compilarán y se guardarán los cambios mediante el botón redondeado en verde de la figura.

3. Enlazar el OPC server con el PLC

Desde la aplicación SIMATIC Manager de nuevo, se selecciona la raíz del proyecto y en la ventana derecha se hace doble clic sobre la red PROFIBUS. Se abrirá la aplicación NetPro, la cual sirve para configurar las redes de comunicación del proyecto.

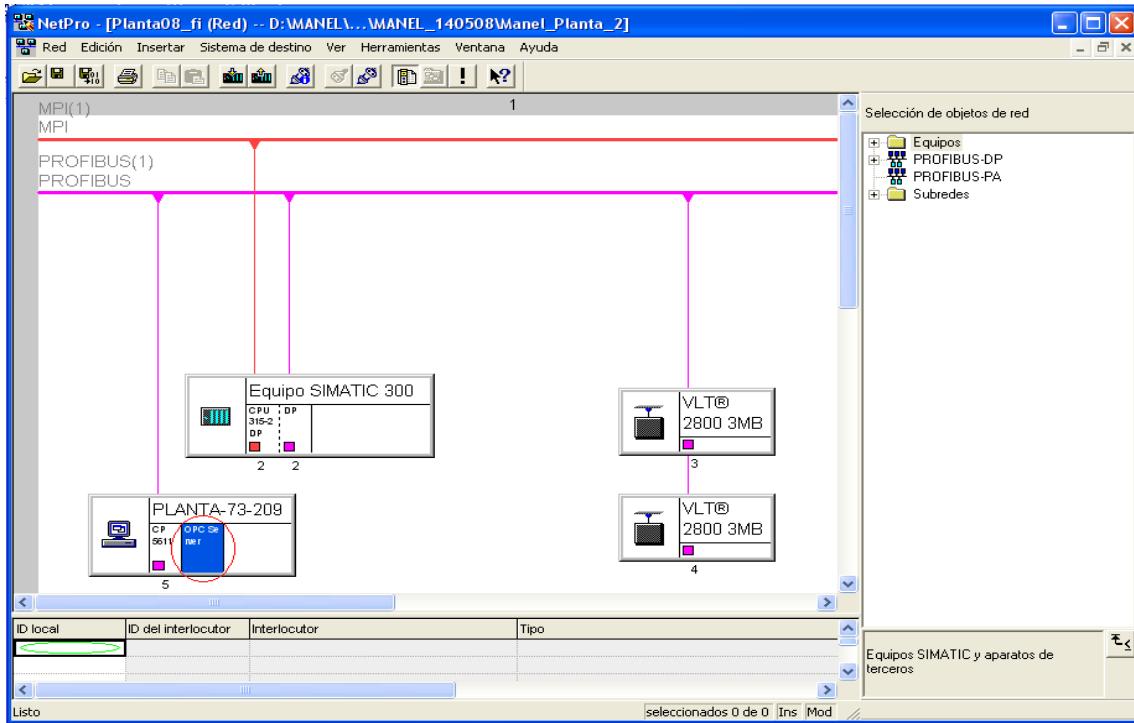


Figura 29: Aplicación NetPro

Se clica en el slot OPC Server del dispositivo PLANTA-73-209 (círculo rojo de la figura anterior) y, a continuación, aparecerá la descripción de los enlaces en la parte inferior de la ventana. Se realizará un doble clic en ID local (círculo verde) y aparecerá la ventana *Insertar nuevo enlace*. Se comprueba que el tipo de enlace sea S7 (círculo rojo en la figura siguiente) y se acepta. Aparecerá una nueva ventana (*Propiedades – Enlace S7*) en la cual se introducirá un nombre al Enlace (círculo azul) y se comprobará que los elementos que intervienen en el enlace sean los correctos (círculo naranja). Al acabar se acepta y se compila y se guarda la aplicación NetPro.

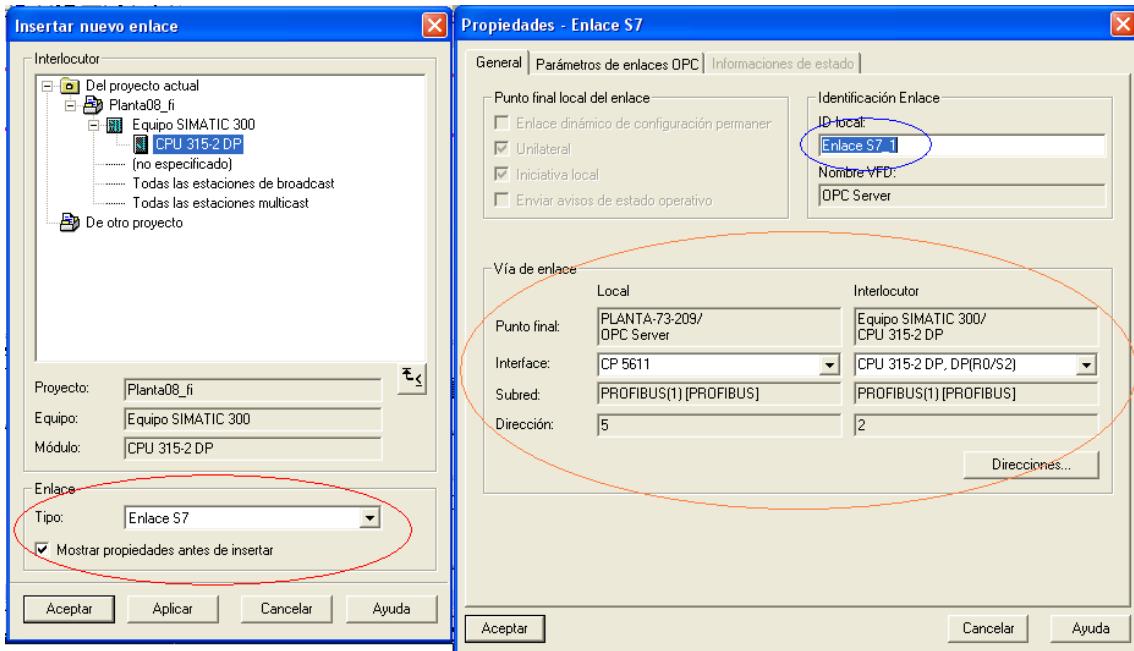


Figura 30: Ventanas de configuración de un Enlace

4. Cargar la configuración en el PC

Para realizar este punto, primero se tendrá que configurar el STATION MANAGER, explicado en el siguiente punto (4.3.2.2.2.2).

Para poder cargar la configuración realizada al PC, se tendrá que cambiar el interface de comunicación de la máquina para el programa Step7. Se procede de la siguiente manera:

Inicio → Panel de Control → Ajustar Interface PG/PC

Aparece la siguiente ventana:

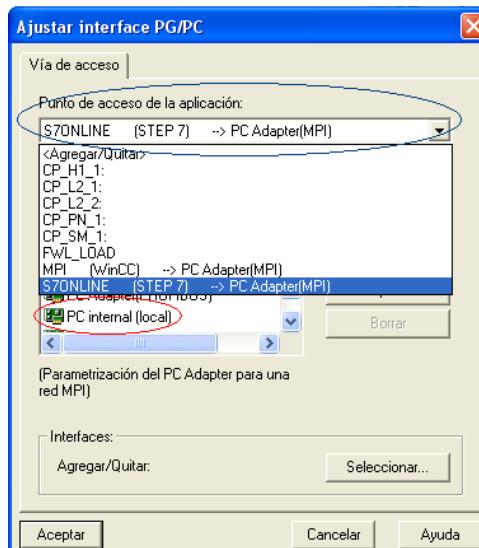


Figura 31: Ventana Ajustar Interface PG/PC

En azul está señalado el menú de puntos de acceso que tiene la aplicación SIMATIC Manager. Dicho menú está desplegado, y se observa que el acceso que utiliza este software para comunicarse con los dispositivos a tratar es el acceso S7ONLINE, que es el que se deberá cambiar. En el momento de captura de imagen la comunicación se establecía mediante el PC-Adapter y el protocolo MPI¹⁰. Así pues, habrá que cambiar esta interface por la *PC Internal (local)*, en la imagen está redondeado en rojo. De esta manera, la aplicación software cargará los datos al PC utilizando el interface seleccionado.

4.3.2.2.2. STATION CONFIGURATOR

Este software lo proporciona SIEMENS y permite acceder a la estación (al PC) como gerente para gestionar sus componentes. Éstos serán los módulos de comunicación (CP5611) y las aplicaciones que participarán en la comunicación (OPC server).

El Station Configurator detecta automáticamente los módulos instalados en la estación PC local y los muestra en el Editor (mediante un menú desplegable), donde se pueden incluir como componentes a utilizar en los bastidores libres. La colocación de estos componentes se realizará acorde con la configuración del PC en SIMATIC Manager, en los mismos bastidores. Para ello, este software permite la importación de la configuración del PC en SIMATIC Manager (se explica más adelante).

Los pasos para la configuración en el proyecto son simples:

1. Abrir el editor

El editor se abrirá haciendo doble clic en el ícono “Station Configurator” del escritorio. La ventana es la siguiente:

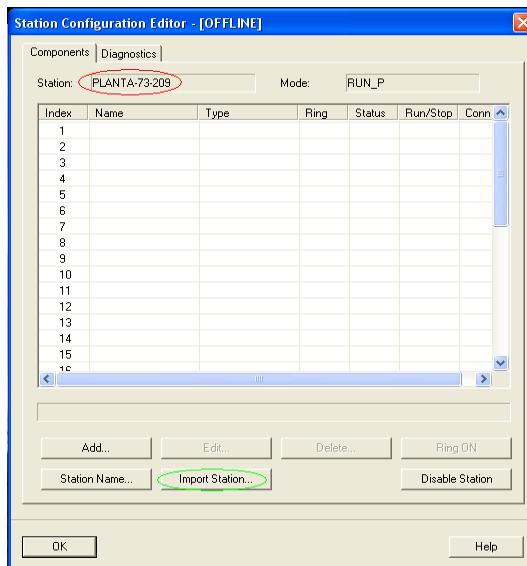


Figura 32: Editor de Station Configurator

¹⁰ Multi Point Interface, protocolo de comunicación.

El círculo rojo indica el nombre de la máquina. En caso de que no se correspondiera con el introducido en la configuración de SIMATIC Manager se tendría que cambiar mediante el botón *Station Name...* La parte central del editor representa los bastidores libres. En ellos se tendrán que colocar los componentes que participan en la comunicación.

2. Introducir los componentes

Para asegurar que se colocan bien los componentes, se importará la configuración del PC realizada en el proyecto SIMATIC Manager. Así pues, se clicará en el botón *Import Station...* y aparecerá una ventana mediante la cual se introducirá la ruta del proyecto.

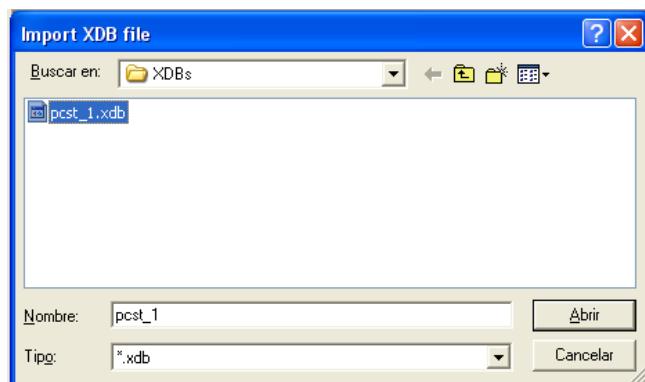


Figura 33: Ventana para indicar la ruta del proyecto. Carpeta XDBs

Dentro de la raíz del proyecto, la configuración está situada en la carpeta XDBs. Se selecciona y se abre.

A continuación, se acepta mediante el botón *OK* y el editor importa los componentes a los bastidores correspondientes, quedando de la siguiente forma:

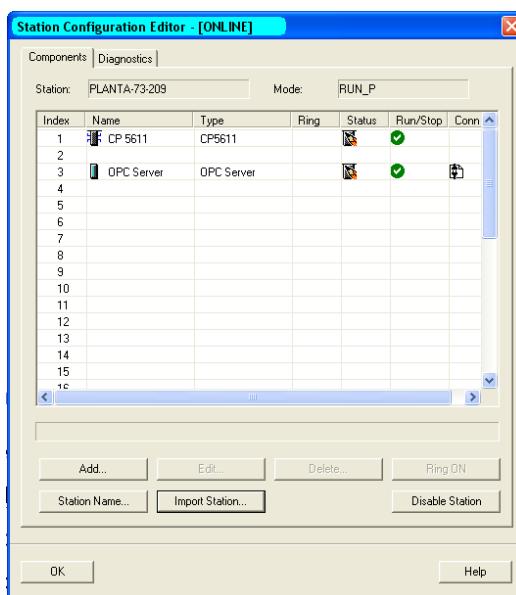


Figura 34: Editor Station Configurator con los componentes colocados correctamente

3. Cargar la configuración desde SIMATIC Manager

Este paso forma parte de la configuración de SIMATIC Manager. Simplemente indicar que ya se puede proceder a ejecutar el último paso explicado en el apartado anterior.

4.3.2.2.2.3. OPC SCOUT

Este software realizará dos funciones:

1. Comprobar la comunicación PC-PLC.
2. Seleccionar los ítems necesarios para la aplicación cliente InTouch.

Para realizar la comprobación de la comunicación, se abre la aplicación en cuestión, se hace doble clic en *OPC.SimaticNET* y aparece la siguiente pantalla:

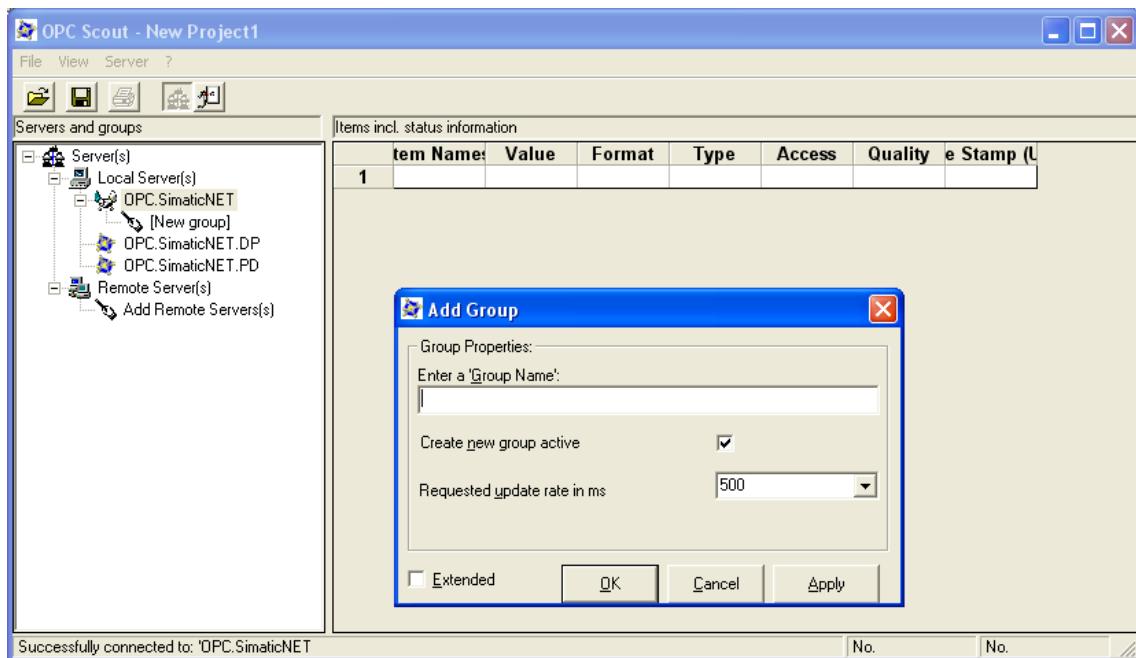


Figura 35: Aplicación OPC Scout de SIEMENS SIMATIC NET

Se entra un nombre de grupo, en este caso será *PRUEBA*, y se clica doble encima del grupo creado, abriéndose la ventana *OPC Navigator* (figura 36).

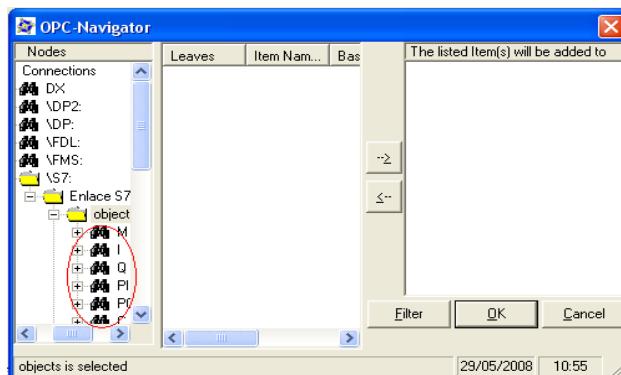


Figura 36: Ventana OPC-Navigator

Seguidamente se procede a comprobar la conexión. Se navega siguiendo la ruta */S7→Enlace_S7→objects* y si se consiguen ver las marcas, las entradas, las salidas, los DBs, etc., (círculo rojo de la figura anterior) es que la conexión se ha establecido correctamente.

Como última comprobación se podría visualizar alguna variable del proceso agregando su dirección, en función de si es una entrada, una salida, una marca o una variable guardada en un bloque de datos (DB). Un ejemplo de buen funcionamiento sería el de la imagen siguiente, donde se han agregado una serie de variables con una calidad de señal buena (círculo azul). En rojo se observa un ícono verde, significando que en PLANTA2008 existen ítems agregados con calidad de señal suficiente.

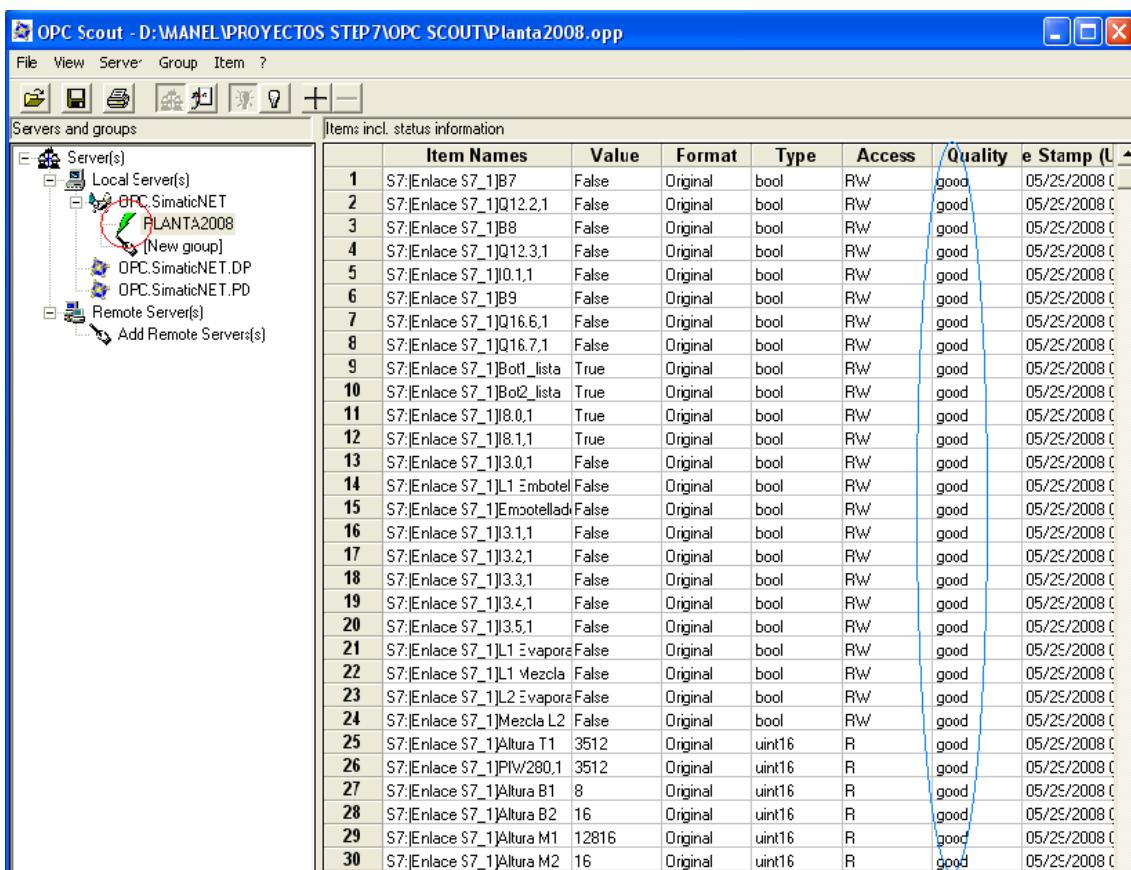


Figura 37: Ejemplo de comunicación correcta entre PC-PLC

Existen otras maneras de comprobar si funciona la comunicación, como por ejemplo la aplicación SIMATIC → SIMATIC NET → settings → Configuration Console, pero de esta forma ya se ha introducido el funcionamiento de esta herramienta imprescindible para la comunicación.

A continuación se realizará la segunda tarea comentada al principio: introducir los ítems que la aplicación InTouch necesitará. Para ello hay que seguir el proceso anterior e ir agregando las direcciones en función de los requerimientos que se precisen.

4.3.2.2.2.4. OPC LINK

Esta herramienta ya forma parte del paquete software del cliente OPC. Tendrá como objetivo interpretar los datos estandarizados del servidor, es decir, interpretar las variables del proceso agregadas en OPC Scout. Se define como un convertidor de protocolos de comunicación, el cual permite que otras aplicaciones de Windows (i.e. InTouch), accedan a los datos que se encuentran en servidores OPC locales o remotos. OPClink se conecta a servidores OPC, convierte comandos de los clientes al protocolo OPC y transfiere de nuevo los datos a los clientes usando DDE, FastDDE o SuiteLink.

Los pasos a seguir para configurar el cliente OPC mediante esta herramienta son:

1. Crear Topic Definition

Mediante el Topic Definition se asociará el nombre del futuro access name¹¹ de InTouch con el tipo de servidor OPC y el path dónde se encuentran las variables requeridas por la aplicación SCADA.

Se procede a abrir la herramienta OPClink, seguido de *Configure* → *Topic Definition ...* tal y como muestra la figura:

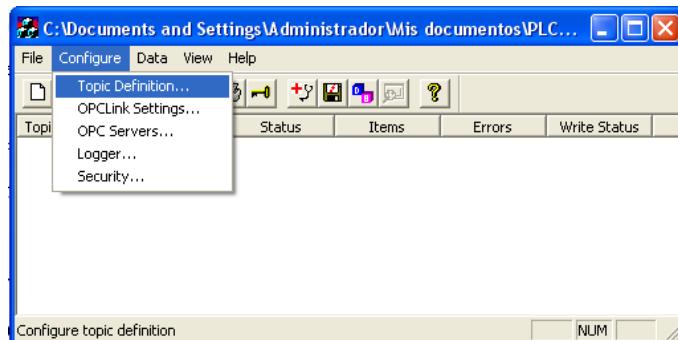


Figura 38: Pantalla principal de la aplicación OPClink

Aparece una nueva ventana dónde se muestran todos los *topics* ya configurados. Si no se tiene ninguno se clica encima de *New...* en la cual se introducirán los parámetros siguientes:

¹¹ Es el nombre que se le dan a los Topics desde InTouch. Así que, desde OPC link se tratará esta configuración con el nombre de Topic, mientras que desde InTouch se conocerá con el nombre de Access name.

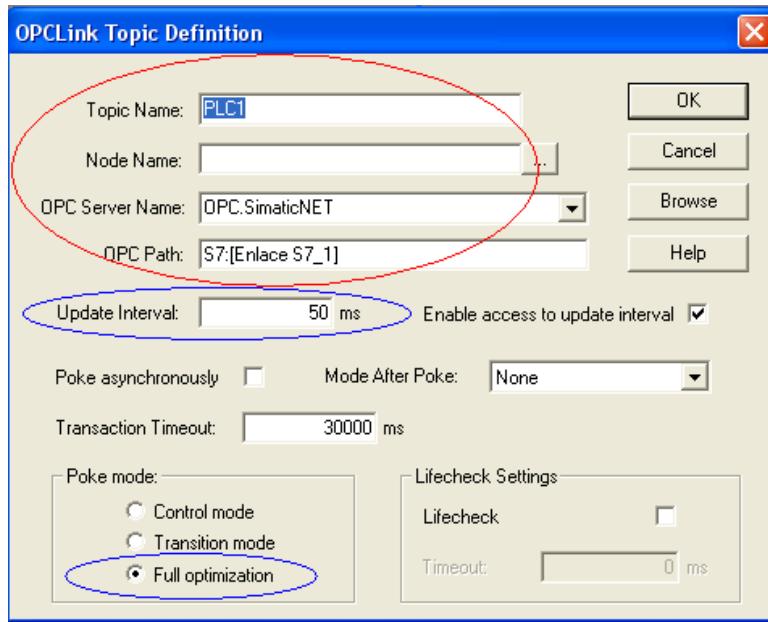


Figura 39: Ventana de configuración del Topic

En círculo rojo se muestran todos los parámetros que hay que introducir:

1. Topic Name: Se puede introducir un nombre cualquiera. Éste será el mismo que el futuro access name de InTouch.
2. Node Name: No se introduce nada.
3. OPC Server Name: La aplicación detecta los OPC servers existentes en la máquina y, mediante la barra desplegable, se selecciona OPC.SimaticNET.
4. OPC Path: Mediante el botón browse se selecciona, de una manera idéntica al OPC Scout, el path dónde están las variables.

Por último, en la figura hay dos círculos en azul. Estas opciones de configuración serán necesarias para optimizar la comunicación y, en consecuencia, obtener un eficiente tiempo de respuesta entre PC – PLC.

2. Comprobar que en las opciones de configuración esté todo correcto.

Ya por último se comprobará que en las opciones de configuración (Configure → OPClink Settings) estén los parámetros siguientes:

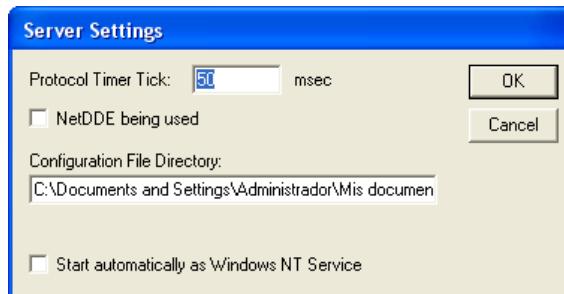


Figura 40: Ventana Server Settings

Una vez realizados todos los pasos de configuración ya se podrá implementar la aplicación SCADA. Ésta tendrá que ir “asociando” sus variables (tags) con las del OPC Server. Para ello se utilizará otra aplicación de la suite de Wonderware (OPCTagCreator) que realizará dicha tarea automáticamente de la siguiente manera:

1. Abrir la aplicación OPC Tag Creator

Desde menú navegable situado a la izquierda de la aplicación InTouch Window Maker (Figura 41) abrimos la aplicación en cuestión (círculo rojo en la figura).

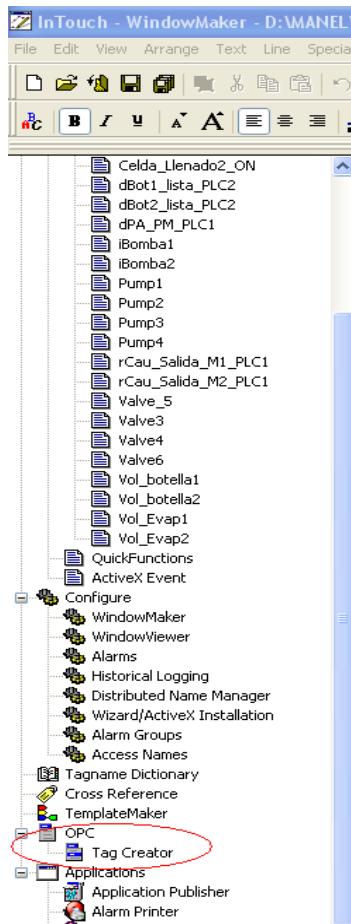


Figura 41: Menú navegable de InTouch Window Maker

2. Creación del tag

En la ventana de la aplicación (figura 42) comprobaremos, en primera instancia, que el access name creado en el OPC Link ha sido detectado por la aplicación. En este caso aparece en la zona inferior derecha de la ventana.

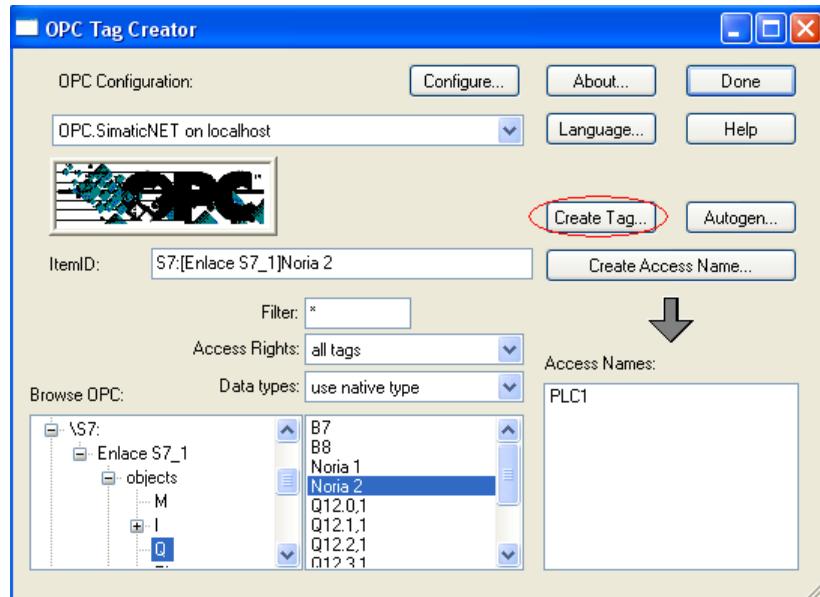


Figura 42: Aplicación OPC Tag Creator

El procedimiento para asociar una variable del servidor OPC a un tag de InTouch es:

- Navegar por las variables del servidor (Browse OPC) hasta seleccionar una o un conjunto de variables. En el ejemplo anterior, mediante el navegador se ha seleccionado un objeto salida (Q) y, en concreto, la variable asociada a la noria 2.
- Una vez seleccionada la variable, se procede a clicar el botón *create tag...* que, automáticamente, te vincula dicha variable OPC con un tag, cuyo nombre se confirmará en una ventana pop up que aparece al clicar el botón anterior.

5. DISEÑO E IMPLANTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DE LA PLANTA

5.1. INTRODUCCIÓN

Los tres apartados siguientes que conforman este capítulo, están dedicados a explicar cada etapa desde dos puntos de vista: funcional, mediante el cual se describirá el objetivo de la etapa, es decir, los requerimientos; y de control de la etapa, en el que se verá el tipo de control realizado, la instrumentación utilizada, etc.

5.2. ETAPA DE EMBOTELLADO

La etapa de embotellado constituye la parte final del proceso de producción: al finalizar ésta, se obtendrá el producto final. En este apartado se explicará la etapa, tal y como se ha comentado en la introducción, desde dos puntos de vista:

- **Funcional**, en el que, por un lado, se tratarán de explicar todos los requerimientos de la etapa a partir de la explicación del proceso batch.
- **Control**, en el que se explicarán la instrumentación y las tareas realizadas a nivel de proceso y control para lograr la funcionalidad anterior.

5.2.1. DESCRIPCIÓN FUNCIONAL DE LA ETAPA

Esta etapa tendrá que embotellar el líquido producido en la etapa de mezcla mediante un proceso batch, consistente en secuenciar tres acciones (explicadas en el apartado siguiente) a fin de obtener un lote final de producto compuesto por una botella llena de cierto volumen de materia mezclada.

El líquido se transporta desde la etapa de mezcla mediante las bombas B1 y B2 (ver figura 43), proporcionando una caudal de entrada a los tanques de embotellado (o un caudal de salida de los mezcladores) igual a q_{in_1} y q_{in_2} . El funcionamiento de estas bombas, tal y como se ha comentado en el apartado 3, es un requisito de producción que determinará la cantidad de producto. Notar que estos caudales de entrada nunca podrán ser mayores a los de salida del tanque de embotellado (q_{out_1} y q_{out_2}), puesto que el líquido desbordaría.

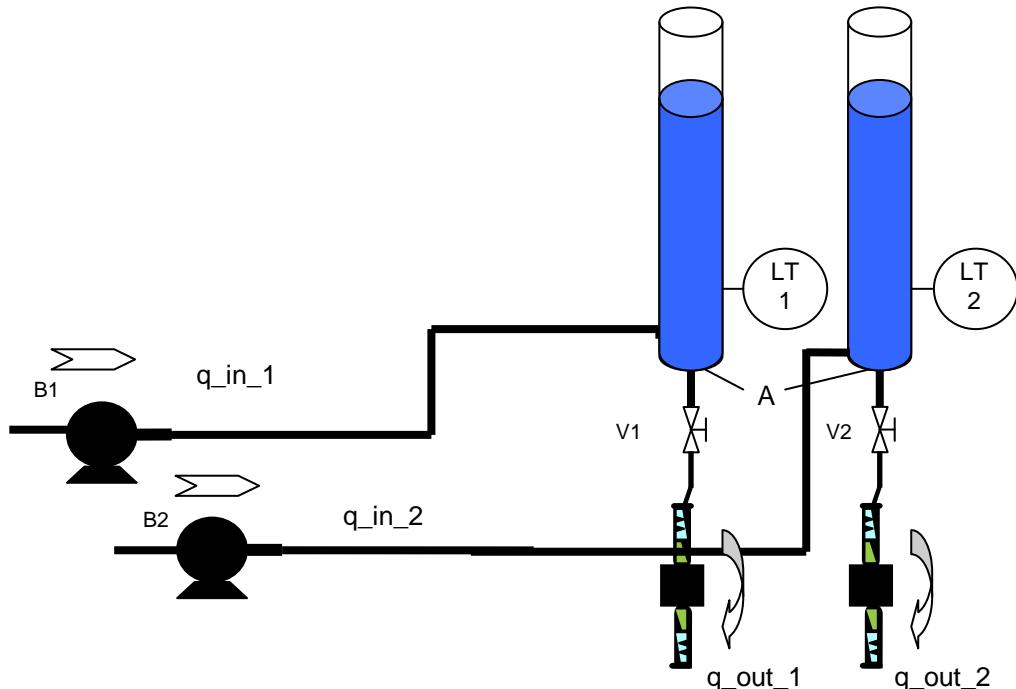


Figura 43: Esquema general de la etapa de embotellado

5.2.1.1. PROCESO BATCH: CICLO DE EMBOTELLADO

El ciclo de embotellado lo definimos como la secuencia de tres tareas¹² que nos permitirán obtener como producto final un lote compuesto por una botella llena de 160ml de líquido producido en la etapa de mezcla. Este volumen ha sido establecido por nosotros en función de las características de las botellas con que trabajamos. A nivel de sistema SCADA, será modificable desde la aplicación de supervisión. Las tareas que nos permiten este resultado son las siguientes:

- 1) Llenado de la botella.
- 2) Estabilización del líquido vertido.
- 3) Giro de la noria.

Cada tarea tendrá asociado el tiempo que necesita para realizarse, de manera que la suma de los tres constituye lo que denominamos Tiempo de Ciclo de Embotellado (TCE). En la figura 44 se observa este concepto gráficamente.

¹² En analogía con los procesos batch, estas tareas constituyen la receta que permite obtener un lote de producto final.

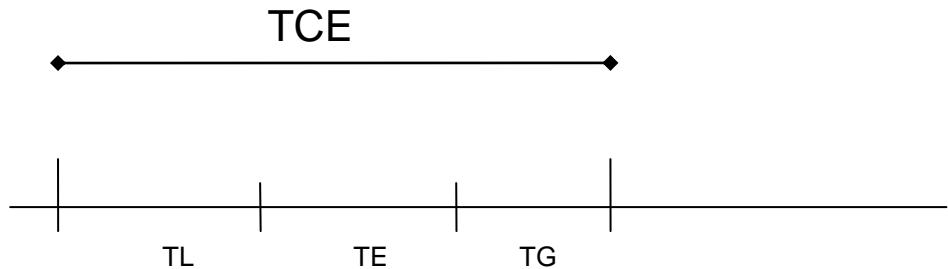


Figura 44: Composición del tiempo del ciclo de embotellado (TCE). TL: Tiempo de llenado de la botella; TE: tiempo de estabilización del líquido; TG: tiempo de giro de la noria.

Por otro lado, se ha definido un nivel mínimo de líquido para los tanques de embotellado, por debajo del cual el sistema se detiene. Así, mientras el nivel esté por encima de este umbral, se irán sucediendo ciclos de embotellado en los que se desarrollarán las tareas citadas anteriormente y descritas a continuación.

5.2.1.1.1. LLENADO DE LA BOTELLA

El llenado de la botella se realiza por gravedad, sin necesidad de bombas que expulsen el líquido. Esto se consigue mediante la forma de los tanques de embotellado, altos y delgados, y a partir de la localización de los elementos que participan. Observando la figura 43 se ve como los tanques están situados por encima de las botellas, con lo que sólo se tendrá que abrir la válvula para dejar caer el líquido.

Una vez entendido el sistema que se utilizará para el embotellado se necesita conocer cuánto tiempo tendrá que estar abierta la válvula para dejar pasar 160ml de líquido. Este valor se determinará ciclo a ciclo en función de la altura de líquido que se tiene en el momento de iniciar el embotellado, lo que permitirá dosificar exactamente cada botella. Para ello habrá que realizar los cálculos explicados a continuación.

Se tiene que determinar una relación entre la altura del líquido en el tanque y el tiempo que tiene que estar abierta la válvula. Para ello se sabe que el caudal que sale de los tanques varía en función de la presión que existe en el punto inferior de éstos (punto A de la figura 43). Más presión implica un embotellado más rápido. A su vez, la presión depende del nivel de líquido en el tanque. La presión que se ejerce en el punto de embotellado, en el extremo superior de la válvula, se calcula mediante la fórmula:

$$P = \rho \cdot g \cdot h$$

Fórmula 5.1

Donde ρ es la densidad, g la aceleración gravitatoria y h el nivel de líquido en el tanque. Por lo tanto, a más altura menor tiempo de llenado de la botella, y, en consecuencia mayor volumen de producción de botellas por unidad de tiempo.

A continuación se calculará el tiempo de llenado T_L (ver figura 44), utilizando la fórmula 5.2 para obtener el caudal que pasa por una válvula con una cierta caída de presión, entre su entrada y su salida.

$$q = a \cdot k_v \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}}$$

Fórmula 5.2

donde:

- **q**: Caudal que circula a través de la válvula en m^3/h
- **a**: Apertura de la válvula [0,1] (cerrada, abierta)
- **kv**: Parámetro de dimensionamiento de la válvula que en este proyecto se ha definido como:

“Caudal de agua a temperatura ambiente en l/min que pasa a través de la válvula abierta y con pérdida de carga (Δp) de 1 bar”

Su determinación se explicará en el apartado 5.2.2.2.

- **Δp** : Caída de presión en la válvula, en bar.
- **ρ** : Densidad del líquido a temperatura ambiente. Como el líquido con el que trabajamos es agua, la densidad la aproximamos por 1kg/l

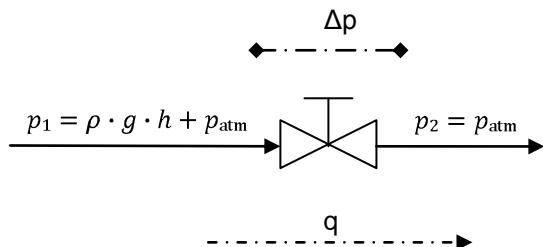


Figura 45: Concepto de la caída de presión que se produce en la válvula abierta

Mirando la figura 45, se observa gráficamente que la presión en la entrada de la válvula corresponde a la fórmula 5.1 más la presión atmosférica¹³, mientras que en la salida tenemos sólo la presión atmosférica (p_{atm}). Así pues, la variación de la presión la podemos expresar de la siguiente manera:

$$\Delta p = \rho \cdot g \cdot h + P_{atm} - P_{atm}$$

Fórmula 5.3

¹³ Pues los tanques de embotellado están abiertos a la atmósfera.

Donde la presión atmosférica se anula. Sustituyendo esta caída de presión en la fórmula 5.2 se obtiene la relación caudal-altura siguiente:

$$q = a \cdot k_v \sqrt{\frac{\rho \cdot g \cdot h}{\rho}}$$

Fórmula 5.4

Ahora, considerando el caudal de llenado constante y correspondiente al valor de altura del tanque (h) que tenemos cuando empieza a llenarse la botella (lo cual implica una pérdida de precisión mínima), se calcula el tiempo de llenado, sabiendo que:

$$q_L = \frac{V_B}{T_L} \leftrightarrow T_L = \frac{V_B}{q_L}$$

Fórmula 5.5

Donde V_B corresponderá a 160cm^3 y q_L al caudal de llenado obtenido anteriormente. Por lo tanto, el tiempo de llenado en función de la altura, a calcular en cada ciclo, será:

$$T_L = \frac{V_B}{a \cdot K_v \sqrt{g \cdot h}}$$

Fórmula 5.6

Teniendo la precaución que en el cálculo del interior de la raíz cuadrada las unidades se manejen de manera que no se pierda la coherencia de la definición de K_v que hemos adoptado.

5.2.1.1.2. ESTABILIZACIÓN DEL LÍQUIDO VERTIDO

Puesto que al verter el líquido a las botellas se produce cierta espuma, se ha optado por introducir una tarea dedicada al reposo del líquido antes de hacer girar la noria, de manera que pueda verse el nivel a que se llenan las botellas. Así, una vez cerrada la válvula, el proceso entrará en un estado en el cual no se ejecutará ninguna acción durante 0,5 segundos. Este tiempo ha sido determinado por nosotros observando que medio segundo ya es suficiente para que el líquido se stabilice, y lo mantendremos constante a lo largo de todos los ciclos. No obstante, este valor será un parámetro del programa, que puede cambiarse.

5.2.1.1.3. GIRO DE LA NORIA

En una planta real, el llenado de botellas implicaría la instalación de una cinta transportadora en la cual fuesen pasando las botellas para ser llenadas. Ante la imposibilidad de instalar este sistema en nuestra planta piloto se optó por introducir un sistema basado en una noria, que simula la llegada y la salida de las botellas. Este componente de la planta está explicado en el apartado de control de la etapa, en el subapartado de instrumentación. Por ahora sólo interesará saber que está formado por dos botellas situadas a 180° la una de la otra, de manera que, mientras una se está llenando, la otra se está vaciando y viceversa.

El tiempo que dura esta tarea estará determinado empíricamente en el laboratorio y corresponde al tiempo que tarda la noria en dar media vuelta para colocar la siguiente botella en posición, y se ha fijado a 1 segundo.

Resumiendo, el tiempo del ciclo de embotellado está compuesto por 2 tiempos fijos (0,5seg + 1,50seg) más 1 variable en función de la altura. A partir de su determinación ciclo a ciclo, se podrán calcular los caudales de salida de los tanques (q_{out_1} y q_{out_2} de la figura 43).

5.2.1.2. CAUDAL DE ENTRADA A LOS TANQUES DE EMBOTELLADO

Una cuestión importante en esta etapa es saber qué caudal de entrada deben proporcionar las bombas $B1$ y $B2$ para que el proceso global de embotellado funcione correctamente. Tal y como se ha dicho, el caudal de entrada será continuo (parámetro de producción) y, como el subproceso de embotellado es batch, nos interesa encontrar el caudal de entrada máximo que nos asegure que el líquido del tanque no desborde. Para ello se igualará este caudal de entrada con el de salida, obtenido de manera teórica, suponiendo un metro de altura en los tanques de embotellado y utilizando el parámetro kv determinado en el apartado 5.2.2.2.

Así pues, utilizando la fórmula 5.4 anterior, para la electroválvula de la línea 1, y sustituyendo todos los parámetros conocidos obtenemos el caudal teórico de salida del tanque de embotellado cuando hay un metro de altura:

$$q = 1 \times 11,558 \sqrt{\frac{1 \times 9,8 \times 1 \times 10^{-2}}{1}} = 3,618 \text{ l/min}$$

Con este valor podemos calcular el tiempo de llenado (aproximado) de la manera que se ha explicado en el apartado anterior:

$$T_L = \frac{160\text{ml}}{3,618 \text{ l/min}} \times \frac{1\text{l}}{1000\text{ml}} \times \frac{60\text{seg}}{1\text{min}} = 2,653\text{seg}$$

Una vez obtenemos el tiempo de llenado calcularemos el TCE tiempo del ciclo sumando a éste los tiempos de estabilización y giro de la noria:

$$TCE = 2,653\text{seg} + 0,5\text{seg} + 1\text{seg} = 4,153\text{seg}$$

Ahora ya podemos obtener el caudal medio de salida del tanque mediante la fórmula 5.5:

$$q_{med} = \frac{0,16l}{4,153\text{seg}} \times \frac{60\text{seg}}{1\text{min}} = 2,312 \text{ l/min}$$

Este es, por tanto, el caudal máximo que puede permitirse en la entrada del tanque de embotellado para garantizar que el nivel nunca exceda de 1m. Ahora necesitamos saber cómo proporcionar un valor concreto de caudal de entrada al tanque de embotellado. Para ello se han hecho una serie de lecturas de caudal para definir el comportamiento de las bombas $B1$ y

B2 de la figura 43. Seguidamente se explica el procedimiento empleado para determinar la curva característica de la bomba 1.

Se ha puesto la bomba a trabajar a varias frecuencias¹⁴ de funcionamiento durante cierto tiempo. Mientras, se recoge el líquido impulsado por la bomba mediante una probeta de 5 litros de capacidad. Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

Tiempo (seg)	Volumen (ml)	Caudal (l/min)	Frecuencia (Hz)	caudal medio (l/min)
85	900	0,64	7	0,64
60	1155	1,16	10,3	1,17
60	1190	1,19	10,3	1,17
60	1740	1,74	14,7	1,73
60	1720	1,72	14,7	1,73
50	1705	2,05	16,9	2,03
60	2020	2,02	16,9	2,03
35,2	2550	4,35	34,3	4,33
25	1795	4,31	34,3	4,33
20,2	2100	6,24	49,6	6,24

Tabla 5: Tabla de medidas tomadas en la bomba 1 para determinar la curva característica de ésta.

Notamos que las dos primeras columnas corresponden a las lecturas del tiempo (utilizamos un cronómetro) y del volumen de líquido bombeado (utilizamos la probeta) y, a raíz de aquí, obtenemos la tercera columna. La cuarta corresponde a la frecuencia del variador, que se traduce en una cierta velocidad de giro del motor de la bomba. La quinta y última se ha añadido porque tomamos, por norma general, dos medidas para cada frecuencia y consideramos la media de ambas como el valor de caudal para dicha frecuencia.

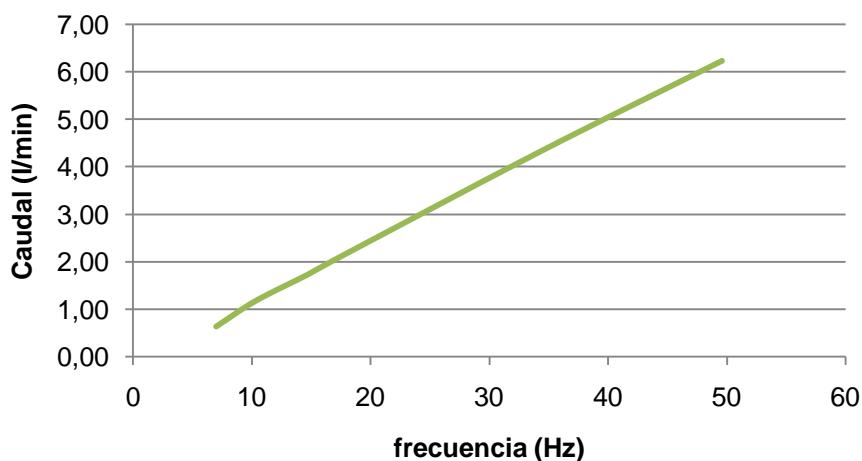


Figura 46: Gráfico asociado a la tabla anterior de la bomba 1. Se muestra el comportamiento de la bomba a distintas frecuencias de funcionamiento

¹⁴ Trabajamos con las bombas mediante una señal de intensidad (4-20mA) a nivel de PLC. La señal se aplica a un variador de frecuencia que la convierte en una referencia de frecuencia a nivel del motor de la bomba. El rango de valores de frecuencia del variador va de 0Hz hasta 50Hz.

Mirando el gráfico de la figura 46 observamos que el comportamiento de la bomba es prácticamente lineal, así que haremos la siguiente aproximación con el objetivo de obtener una función que permita, dado un caudal, obtener la frecuencia de funcionamiento. Dicha aproximación se realizará en el software Matlab, ya que posee una función que realiza un ajuste polinomial de datos. El funcionamiento de ésta es el siguiente:

- Dado un conjunto de pares de datos (puntos en el plano), representados en Matlab mediante dos vectores x e y que almacenan, respectivamente, las coordenadas x e y de dichos datos, puede realizarse un ajuste polinómico de grado n ($n=1$ para una recta, ...) de los mismos sin más que invocar la función polyfit.

El resultado de la ejecución es la función de primer grado (ya que la gráfica es lineal) siguiente:

$$y = 0,132x - 0,186$$

En este punto ya podemos conocer a qué frecuencia debe trabajar el motor de la bomba para que ésta nos proporcione el caudal deseado de entrada al tanque. Simplemente tendremos que encontrar el valor de la variable x cuando $y = 2,312$, y obtenemos:

$$x = \frac{y + 0,186}{0,132} = \frac{2,312 + 0,186}{0,132} \cong 19 \text{ Hz}$$

A partir de esta igualdad de caudales se conseguirá que, en estado estacionario del proceso, el nivel de líquido varíe en torno al metro de altura.

5.2.2. CONTROL DE LA ETAPA

En este apartado se verán los aspectos relacionados con el control de esta etapa, como los instrumentos que intervienen, los cálculos relacionados con dichos instrumentos o el programa del PLC, que hacen posible un funcionamiento como el descrito en el apartado anterior. El esquema de control de la etapa es el de la figura 47, en el que se observan las distintas señales de control que intervienen.

5.2.2.1. INSTRUMENTACIÓN

Seguidamente veremos un listado con los diferentes instrumentos y componentes captadores y actuadores que intervienen en el proceso de esta etapa y que podemos observar en la figura 47.

Sensores (captadores)

(LT1 y LT2)

Fabricante: PEPPERL+FUCHS

Modelo: UC2000-30GM-IUR2-V15

Características principales: Proporciona la señal estandarizada.

Tipo: Ultrasónicos.

Tipo de salida: 0-10V o 4-20mA.

Actuadores

Electroválvulas (V1 y V2)

Fabricante: SMC

Modelo: VXZ2230-03F-4DR1

Características principales: Kv variable en función de la presión.

Tipo: Todo abierto o todo cerrado (on/off).

Tipo de entrada: 220V AC

Bombas peristálticas (B1 y B2)

Fabricante: Watson Marlow

Modelo: ----

Características principales: caudal máximo de 7l/min

Tipo: peristálticas

Tipo de entrada: 220V AC trifásica

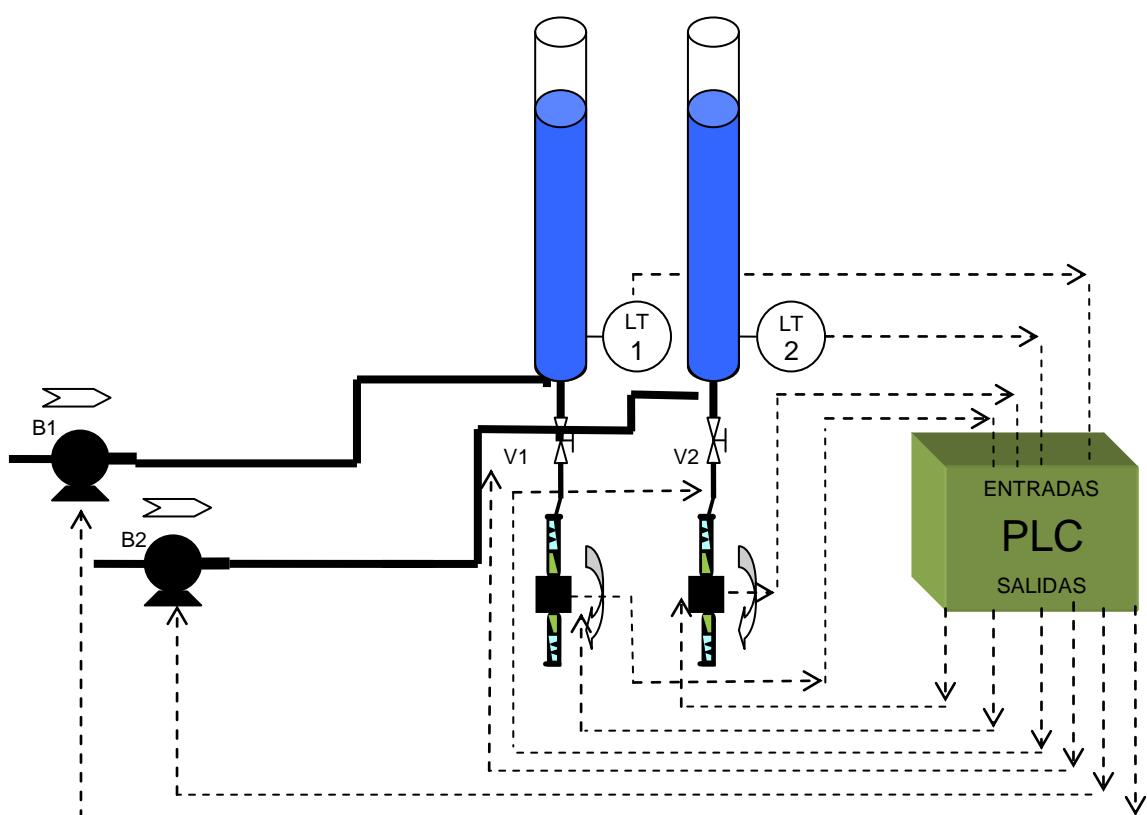


Figura 47: Esquema de control de la etapa de embotellado. Señales de control.

Elementos de proceso

Tanques embotellado (uno para cada línea)

Capacidad: 11,3 litros.

Características principales: su forma es estrecha y alargada.

Tipo: Polietileno.

Tubos

Características principales: Transportarán el líquido hasta los tanques de embotellado.

Tipo: Silicona.

Botellas (dos para cada línea)

Capacidad: 160 ml.

Tipo: Cristal.

Un elemento (actuador y sensor) que no se ha nombrado es la noria (figura 48), de diseño y construcción artesanos. Hay que considerarla como un elemento doble que capta si la botella está lista y actúa sobre el motor haciendo un medio giro entero a cada pulso entrante desde el PLC. Esto lo consigue mediante el interruptor final de carrera que, si está pulsado, manda una señal al PLC indicando que la botella está en posición. Si se actúa sobre el motor con un pulso, el interruptor salta y conduce, dejando actuar al motor hasta que el interruptor se vuelva a pulsar, parando el actuador. De esta manera nos aseguramos que la botella no quede nunca en una posición intermedia del giro, puesto que el interruptor hará que se pare en estado conocido. Para un mayor entendimiento se muestra el esquema eléctrico de la noria.

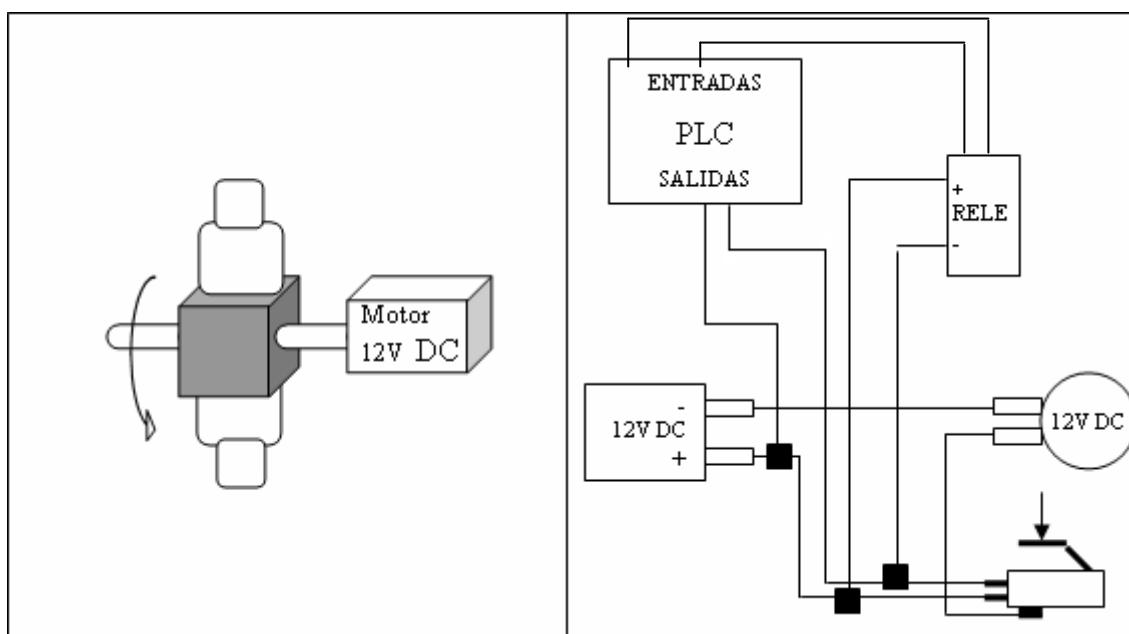


Figura 48: Izquierda: esquema general de la noria; derecha: esquema eléctrico de la noria

5.2.2.2. DETERMINACIÓN DEL KV DE LAS ELECTROVÁLVULAS

En el apartado anterior se han presentado las electroválvulas como un elemento actuador del sistema. Cada válvula, como se ha visto en el apartado 5.2.1.1, tiene asociado un parámetro que define su comportamiento (el K_v), según la fórmula 5.2 ya vista. Para determinar su valor se realizó el experimento que se describe a continuación:

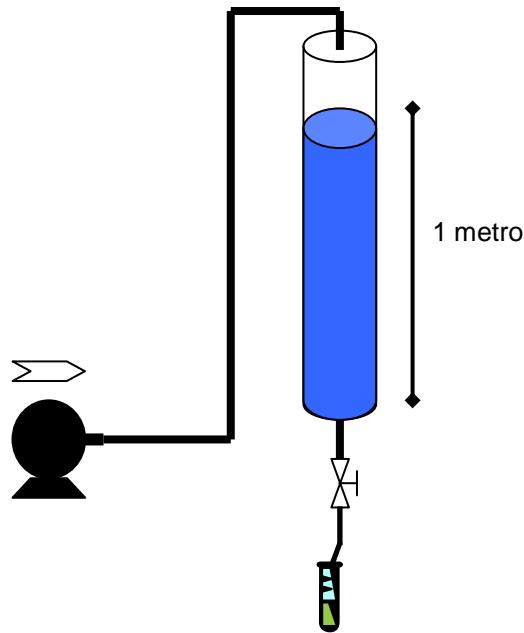


Figura 49: Esquema del experimento para determinar el Kv de las electroválvulas. Se procura mantener el nivel constante a un metro de altura

Partiendo de la fórmula 5.4, observamos que tenemos dos variables desconocidas, kv y q , de las cuales tendremos que determinar, en primer lugar, q . Su valor lo calcularemos empíricamente, siendo esta parte el bloque central del experimento. Idealmente, tendríamos que hacer los cálculos manteniendo una altura fija (i.e. un metro) mientras mantenemos abierta la electroválvula, lo que implicaría implementar un lazo de control de nivel del tanque, fijando el set-point a 1m. A fin de obtener una aproximación razonable del Kv que no implique la implementación del lazo de control de nivel, se procedió como se explica a continuación.

Sabiendo que el caudal se define como el volumen que pasa por unidad de tiempo, el experimento se centró en hacer lecturas del volumen que salía del tanque durante un tiempo conocido. Así pues, se procedió a hacer un programa simple, compuesto por un timer que, mientras duraba su ejecución, mantenía la electroválvula abierta y, al finalizar, la cerraba. Así se obtuvo una manera de conocer el volumen exacto que sale del tanque durante 5 seg. Cabe destacar que cada lectura se hizo mediante una probeta de 500ml intentando ser lo más riguroso posible.

Una vez anotado el valor del volumen, el líquido depositado en la probeta se volvía a introducir en el tanque, para conseguir el mismo nivel que en la anterior lectura. Este proceso se repitió 5 veces para cada válvula (una por cada línea de embotellado) y, para aproximar mejor el valor del parámetro, se hizo una media aritmética de los valores encontrados, tal y como se muestra en la tabla 6.

Nº lectura	1	2	3	4	5	media
Volumen (ml)	284	304	308	304	296	299,2
Caudal (l/min)	3,41	3,65	3,70	3,65	3,55	3,59

Tabla 6: Tabla de las lecturas de caudal realizadas en la electroválvula de la línea 1. Para la segunda línea el procedimiento será análogo.

Una vez conocemos el caudal medio de todas las medidas sustituimos los valores conocidos en la fórmula 5.2, obteniendo el siguiente resultado:

$$Kv = \frac{q}{a \times \sqrt{\frac{\rho \times g \times h}{\rho}}} = \frac{3,59}{0,31} = \mathbf{11,5 \text{ l/min}}$$

A la hora de poner en práctica este cálculo, nos dimos cuenta que el comportamiento de la válvula no era el mismo (las botellas no se llenaban al mismo nivel) si se trabajaba a una altura alta que a una baja. Esto nos indujo a pensar que, aunque en teoría el parámetro Kv de una válvula es constante, pudiese tener un valor diferente en función de la altura. Para comprobarlo, se procedió a realizar el experimento anterior para cinco alturas distintas del tanque de embotellado, obteniendo los resultados que muestra la tabla 7:

Línea 1		
Volumen(ml)	Altura (m)	Kv
205	1,04	11,558
190	0,895	11,55
177	0,74435	11,8
166	0,6341	12
156	0,544	12,16
153	0,5065	12,289
149	0,465	12,467
143	0,42275	12,646
134,5	0,34665	13,135
130	0,288	13,92
121,5	0,24	14,268

Tabla 7: Resultado de los cinco experimentos para determinar el Kv de la electroválvula 1.

que se muestran gráficamente en la figura 50:

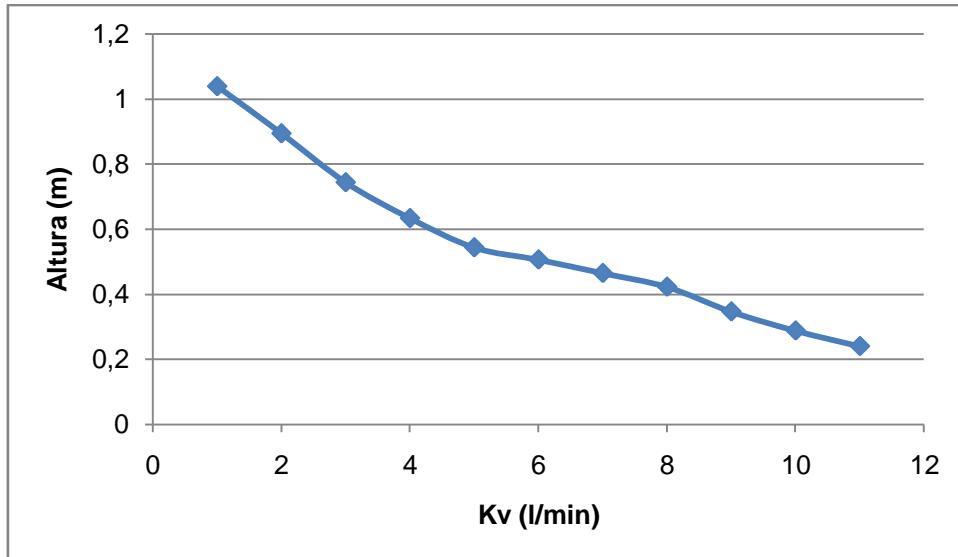


Figura 50: Grafica de la curva de funcionamiento de la electroválvula 1 en función de la altura del tanque.

que corrobora que nuestra hipótesis era correcta.

En consecuencia, se procedió a calcular una función que ajustase lo mejor posible los datos de la curva de la figura anterior. Para ello, se utilizó el comando polyfit de Matlab, que proporcionó el siguiente polinomio de grado 3:

$$y = -0,3812x^3 + 1,1626x^2 - 1,269x + 1,6952$$

que ajusta razonablemente los datos experimentales.

A nivel de programación del PLC, esto implica que calcular ciclo a ciclo el Kv de la electroválvula para, posteriormente, realizar los cálculos de tiempo asociados al proceso batch de embotellado.

5.2.2.3. SEÑALES DE CONTROL

Es importante conocer las señales de control de la etapa con las que se tendrá que trabajar. La figura 47 se puede hacer una clasificación de las señales de entrada y salida que intervienen.

SALIDAS independientes: Son señales que no dependen de ninguna entrada en tiempo de ejecución, sino que es el planificador de la producción que asigna sus valores.

- Señal de control de las bombas, intensidad (4-20mA).

ENTRADAS: Son las señales que llegan desde la planta a nuestro PLC.

- Transmisores de nivel de los tanques de embotellado, intensidad (4-20mA).
- Interruptores final de carrera de las norias, voltaje (0V-off / 24V on).

SALIDAS dependientes: Señales directamente relacionadas con las entradas al PLC.

- Electroválvula, voltaje (0V off / 230V on).
- Motor de la noria, voltaje mediante relé (0V off / 12V on).

5.2.2.4. PROGRAMA

A continuación se muestra la explicación del programa del PLC que implementa la funcionalidad de esta etapa, viendo los bloques que intervienen y las funciones que desempeñan. En la figura siguiente se observan las llamadas a las funciones que se producen en un ciclo de ejecución.

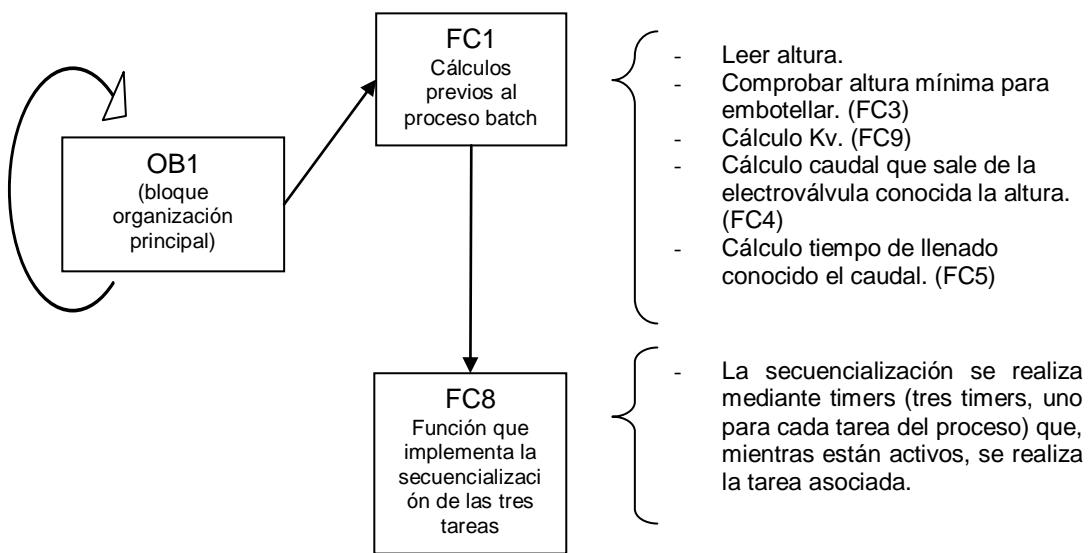


Figura 51: Ejecución de un ciclo de embotellado correspondiente a la línea 1 de la planta

Mirando el esquema anterior, el bloque de organización 1 (OB1) se ejecuta cíclicamente cada 200 ms. En cada ciclo hará una llamada a la función FC1, encargada de realizar todas las tareas de cálculo y de comprobación de altura mínima indicadas en la figura 51. Si se cumple la altura mínima para iniciar un ciclo de embotellado se procede a llamar a la función FC8. Por el contrario, si no se cumple, el flujo de ejecución del programa volverá a OB1.

La función FC8 se encargará de realizar las tareas propias del proceso batch. Cada tarea tiene asociado un tiempo (visto en el apartado 5.2.1), a nivel de programación, un timer. Mientras se está ejecutando, se realizarán las acciones pertinentes sobre los actuadores. Al finalizar las tres tareas se vuelve a OB1.

El código fuente de las funciones programadas en esta etapa está expuesto en el Anexo A1.

5.3. ETAPA DE MEZCLA

Etapa central de la planta, en la cual se realizará un proceso continuo de mezcla de dos líquidos. Como en el apartado anterior, se analizará la etapa desde dos puntos de vista:

- **Funcional**, en el que se expondrán las características de la etapa que hay que tener en cuenta para realizar el control de la mezcla, desde la recogida del componente proveniente del evaporado, hasta la salida del líquido mezclado.
- **Control**, en el que se tratará la instrumentación de la etapa, las señales de control que intervienen, los lazos de control implementados, el funcionamiento y configuración del regulador industrial, así como el programa del PLC que realiza el control global de dicha etapa.

5.3.1. DESCRIPCIÓN FUNCIONAL DE LA ETAPA

En la figura siguiente se muestra el esquema general de la etapa, a partir del cual se explicará con detalle el proceso de mezcla.

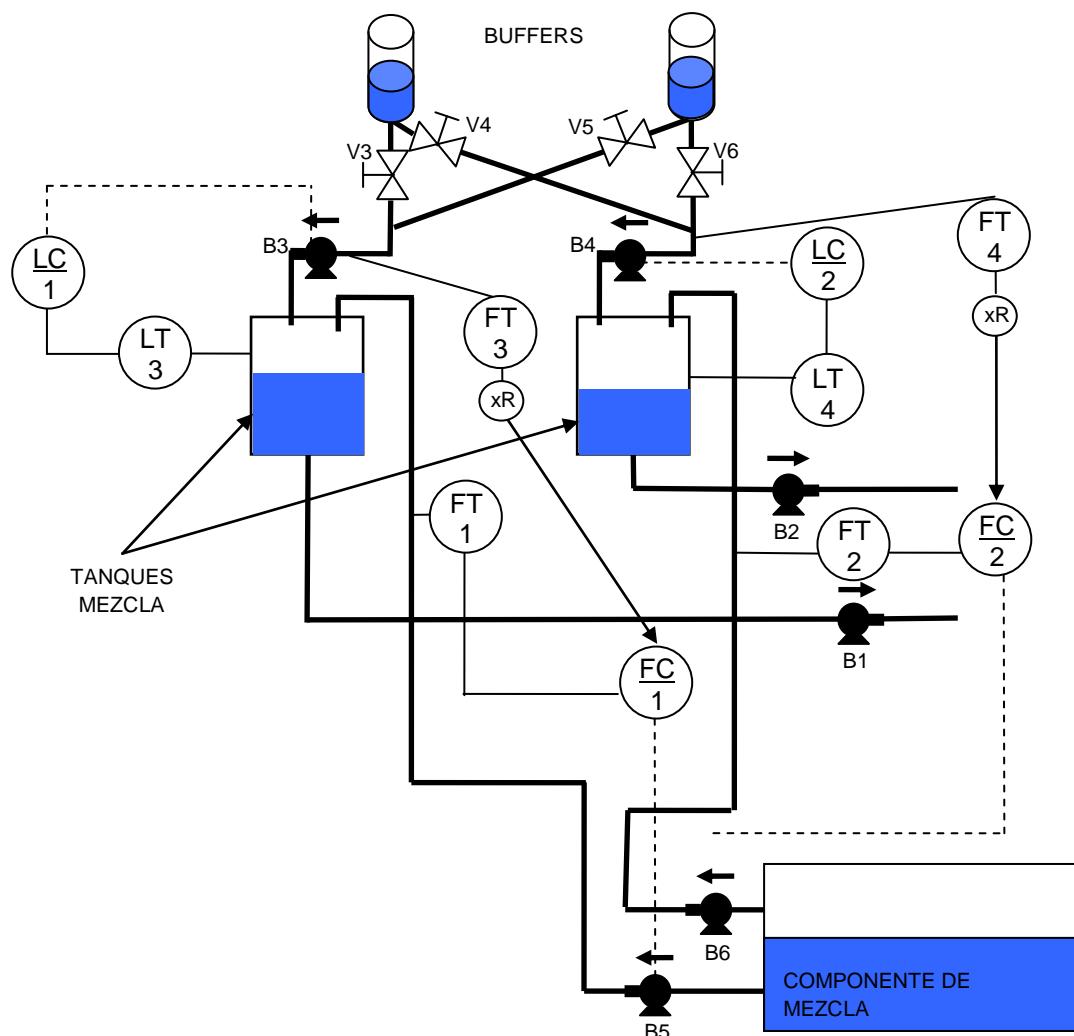


Figura 52: Esquema general de la etapa de mezcla. Están contemplados también los lazos de control que se implementarán.

La idea general de la etapa es la de mezclar dos componentes líquidos a fin de elaborar el producto final. Un componente procede de la etapa anterior (evaporación) y se encuentra depositado en los tanques de almacenamiento temporal (buffers). El segundo, se encuentra en un tanque aparte y no se le ha realizado ninguna manipulación previa.

Por un lado, se recoge el componente producido de los buffers mediante el conexionado de tubos y electroválvulas, y las bombas 3 y 4. Dicho conexionado está formado por cuatro posibles caminos, cada uno de ellos asociado a una electroválvula:

1. **Camino de V3:** Si V3 está abierta, el líquido vendrá de la etapa de evaporación de la línea 1 (buffer 1) al tanque de mezcla 1.
2. **Camino de V4:** Si V4 está abierta, el líquido vendrá de la etapa de evaporación de la línea 1 (buffer 1) al tanque de mezcla 2.
3. **Camino de V5:** Si V5 está abierta, el líquido vendrá de la etapa de evaporación de la línea 2 (buffer 2) al tanque de mezcla 1.
4. **Camino de V6:** Si V6 está abierta, el líquido vendrá de la etapa de evaporación de la línea 2 (buffer 2) al tanque de mezcla 2.

El estado (abierto/cerrado) de estas electroválvulas se asigna desde la aplicación de supervisión (explicada en el capítulo 6), la cual envía al PLC la información correspondiente para que éste genere las señales de control adecuadas y las envíe a las electroválvulas.

Por otro lado, utilizando las bombas 5 y 6, se transportará el componente de mezcla a los tanques correspondientes, a fin de mezclar los dos líquidos en la proporción requerida. Para ello, la etapa dispone de cuatro caudalímetros y de dos sensores de nivel, mediante los cuales se conseguirá mezclar correctamente y mantener un nivel adecuado en los tanques de mezcla.

Por último, la mezcla saldrá de los tanques de manera continua, por un orificio en la parte inferior de éstos, al ritmo que impongan las bombas 1 y 2 explicadas en el apartado anterior 5.2.1.2

5.3.2. CONTROL DE LA ETAPA

En este apartado se verán aspectos como la instrumentación utilizada, las señales de control y se explicará el programa del PLC, pero también se hará hincapié en exponer los métodos de control necesarios para cumplir los requerimientos funcionales, así como los recursos para implementarlos (i.e. función PID que incorpora el PLC de SIEMENS).

5.3.2.1. INSTRUMENTACIÓN

A continuación se mostrarán los distintos elementos que intervienen en esta etapa y que se pueden observar en la figura 53.

Sensores (captadores)Nivel (LT3 y LT4)

Fabricante: PEPPERL+FUCHS

Modelo: UB400-12GM-I-V1

Características principales: Proporciona la señal estandarizada.

Tipo: Ultrasónicos.

Tipo de salida: 4-20mA.

Caudal (FT1, FT2, FT3 y FT4)

Características principales: Caudalímetro + convertidor

Tipo: Turbina.

Tipo de salida: 0-5V o 4-20mA.

ActuadoresElectroválvulas (V3, V4, V5 y V6)

Fabricante: M&M

Tipo: Todo abierto o todo cerrado (on/off).

Tipo de entrada: 220V AC

Bombas peristálticas (B3 y B4)

Fabricante: Watson Marlow

Modelo: MG0611

Características principales: caudal máximo de 7l/min

Tipo de entrada: 220V AC trifásica

Bombas (B5 y B6)

Fabricante: FLOJET

Modelo: 4405-143

Características principales: caudal máximo de 10l/min

Tipo de entrada: 12V DC

Elementos de procesoTanques de mezcla (uno para cada línea)

Capacidad: 12 litros.

Tipo: Polietileno.

Tanque componente de mezcla

Capacidad: 100 litros aprox.

Tipo: Polietileno.

Tubos

Características principales: Transportan el líquido.

Tipo: Silicona.

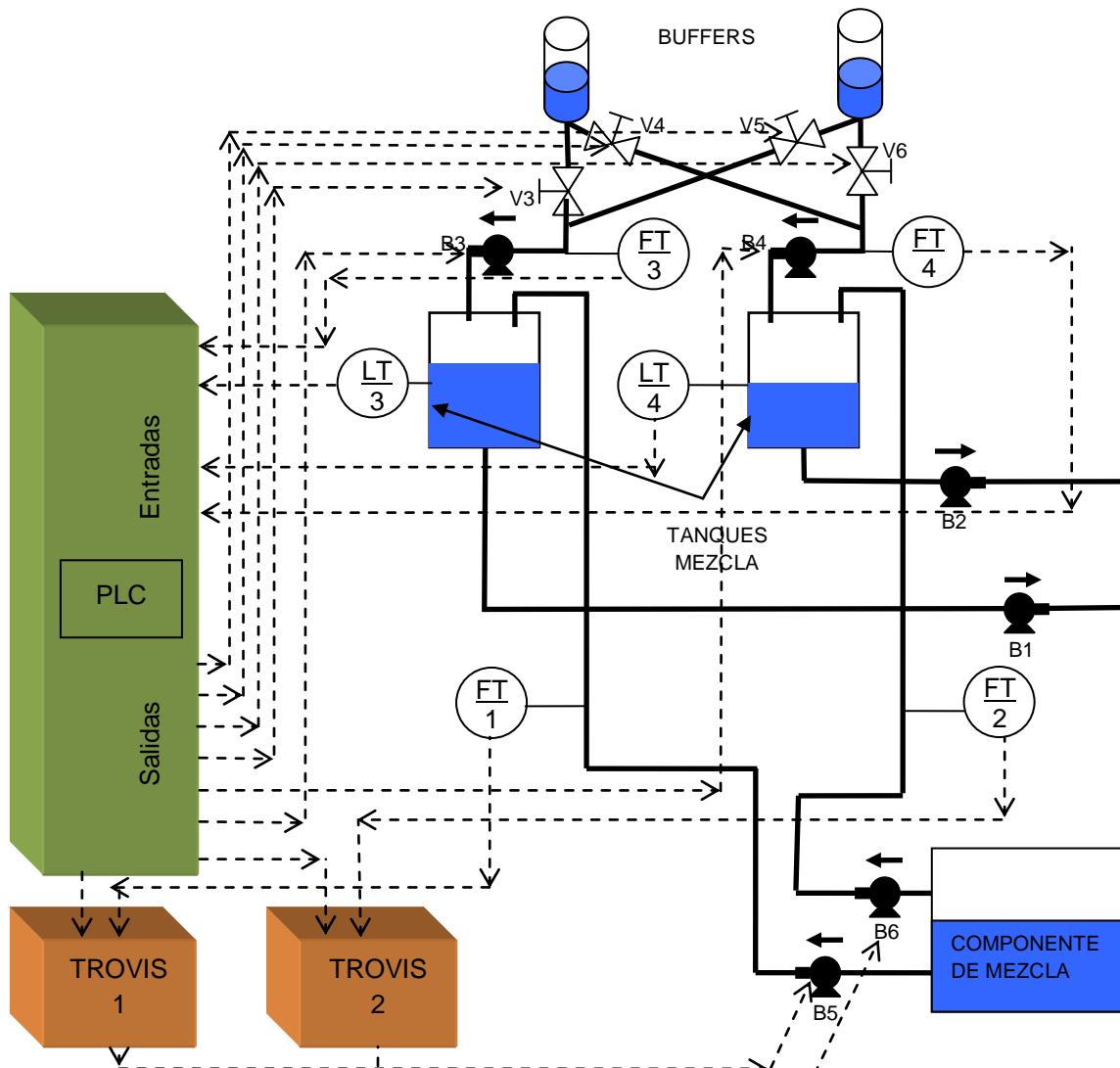


Figura 53: Esquema de control de la etapa de mezcla. Señales de control.

5.3.2.2. SEÑALES DE CONTROL

Mirando la figura 53 se hará la siguiente clasificación de las señales de control:

SALIDAS independientes:

- Señal de control de las electroválvulas, voltaje 220AC

ENTRADAS al PLC:

- Transmisores de nivel de los tanques de mezcla (LT3 y LT4), intensidad (4-20mA).
 - Transmisores de caudal FT3 y FT4, voltaje (0-5V)

SALIDAS dependientes del PLC:

- Señales de control de las bombas 3 y 4, intensidad (4-20mA).
 - Señales de setpoint hacia los dos Trovis, intensidad (4-20mA).

ENTRADAS al TROVIS

- Señal de setpoint del PLC, intensidad (4-20mA).
- Transmisores de caudal FT1 y FT2, intensidad (4-20mA).

SALIDAS del TROVIS

- Señales de control hacia las bombas 5 y 6, voltaje (0-10V).

5.3.2.3. TIPOS DE CONTROL REALIZADOS

Esta etapa tiene que realizar dos funciones: mezcla de los dos componentes en la proporción deseada y control del nivel del tanque. Para ello se implementarán dos tipos de control: control de nivel y control ratio¹⁵. El primero estará íntegramente implementado en el PLC, y el segundo entre el PLC (aplicará la multiplicación del ratio) y el regulador industrial Trovis 6496.

5.3.2.3.1. CONTROL NIVEL

Consiste en un lazo de control PID, implementado en el PLC. Mediante la lectura de los sensores y la correcta sintonía del PID (explicada a continuación), se actuará sobre las bombas 3 y 4 para conseguir mantener el nivel del tanque de mezcla en el valor de set point. Dicho valor se asigna en la aplicación de supervisión de supervisión.

Los valores de sintonía de los parámetros del PID han sido determinados siguiendo el algoritmo expuesto a continuación, conocido como algoritmo de sintonía empírica.

INICIO

Anular la acción derivativa ($T_d = 0$)

Anular la acción integral ($T_i = 0$)

REPETIR**REPETIR**

Ajustar K_c . Probar el control

HASTA Error estacionario “pequeño”, transitorio aceptable

REPETIR

Ajustar T_d . Probar el control

HASTA Forma de respuesta aceptable

HASTA Velocidad y forma de respuesta aceptable

REPETIR

Ajustar T_i . Probar el control

HASTA Anular error estacionario “suficientemente deprisa”

FIN

y corresponden a:

¹⁵ Tipo de control utilizado para mantener proporciones entre dos variables de proceso.

- K_c : 40.
- T_i : 2.
- T_d : 1.

Destacamos que en el algoritmo anterior de sintonía se ha indicado que la acción integral se anula con $T_i = 0$, ya que el algoritmo PID que incorpora el PLC no es el algoritmo PID clásico, en el que el término que multiplica a la acción integral es K_c/T_i , sino que estos dos controladores implementan la acción integral multiplicada por un término $K_c \cdot T_i$, y de ahí que para anular la acción integral debamos asignar $T_i=0$.

5.3.2.3.2. CONTROL RATIO

Para mantener una relación de caudales deseada entre dos componentes se ha implementado una estructura de control denominada control de relación o control ratio.

Existen distintas formas de implementar el control ratio. Aquí hemos optado por la más habitual en la práctica que consiste en medir uno de los caudales, multiplicarlo por la relación que debe mantener respecto al segundo y tomar dicho producto como valor deseado (set-point) del segundo caudal, que es el que se controla.

En nuestro caso, considerando los instrumentos disponibles, la idea anterior se ha traducido en lo siguiente:

- La acción de multiplicación la realiza el PLC que, mediante dos caudalímetros, obtiene el caudal que subministra la bomba 3 y 4. Posteriormente lo multiplica por el factor de relación y lo envía a los reguladores Trovis como valor de set-point.
- La segunda acción la realizan dichos reguladores, que controlan las variables de caudal de componente de mezcla mediante dos caudalímetros y las acciones ejercidas sobre las bombas 5 y 6.

El PID ha sido sintonizado mediante el algoritmo expuesto anteriormente, obteniendo los siguientes valores:

- $K_p = 1,5$.
- $T_i = 8$.

En este caso no se ha utilizado la acción derivativa ya que, en los casos en que la lectura de la variable controlada contiene ruido, dicho efecto resulta contraproducente. Destacar también que en el algoritmo PID que implementan los reguladores Trovis también se anula la acción integral mediante $T_i = 0$, por la misma razón expuesta en la explicación del algoritmo de sintonía del apartado anterior.

5.3.2.4. TROVIS 6496. CONFIGURACIÓN

El Trovis, como todos los reguladores industriales, es configurable, permitiendo introducir, entre otros parámetros, las constantes de cada acción PID. Seguidamente se mostrará una tabla con los parámetros más importantes:

Selección	Descripción	Rango de valores	Valores
Nivel de Parametros			
KP	Coeficiente de acción Proporcional	0,1 – 199,9	1,5
TN	Componente Integral	1 – 1999	8
TV	Componente Derivativa (0 = off)	1 – 1999	0
KD	Tasa de ganancia (0 = off)	1 - 10	0
WR	Dirección de la operación	0 – 1	1
Y↓	Límite inferior de la variable manipulada. Unidades de ingeniería.	-109,9 - Y↑	0
Y↑	Límite superior de la variable manipulada. Unidades de ingeniería.	Y↓ - 109.0	90
Nivel de Configuración			
XN	Límite inferior de la variable mesurada. Unidades de ingeniería.	-109,9 – XE	0,43
XE	Límite superior de la variable mesurada. Unidades de ingeniería.	XN – 109,9	8,32
X,	Punto decimal de la variable mesurada.	1.000 – 1000	1,000
XM	Elección de la señal de entrada.	0 – 6	001
XT	Unidades de temperatura	0 – 1	0
X*	Entrada física de las señales en mA o V	0 - 1	1
W*			
Y*			
DI	Componente e acción derivativa	0 - 1	0
WM	Elección del set point	0 - 7	4

Tabla 8: Valores de configuración del Trovis para el control de caudal

Hay que tener en cuenta que la tabla anterior es un resumen de la configuración de los Trovis en este proyecto. Para obtener mayor información hay que consultar el manual (SAMSON 2004) adjunto en la bibliografía. Notar también, que el regulador trabaja con tres señales:

- X = señal captada por el sensor (variable controlada), entrada.
- W = señal de set point, entrada.
- Y = señal de control del regulador, salida.

Por un lado se configuraran las unidades de ingeniería para la señal de control hacia las bombas, y por otro se configurarán las unidades de ingeniería para las señales de set point y del sensor, que deberán ser las mismas.

5.3.2.5. PROGRAMA

El programa de control del PLC se divide en dos partes claramente diferenciadas. A continuación se explicará el funcionamiento mediante el ejemplo de la línea de producción 1. Por un lado, se ejecutará cíclicamente la función FC11, que implementa el lazo de control asociado al nivel del tanque. Por otro lado, siempre que se esté ejecutando la etapa de mezcla (en el OB1 se produzca la llamada a dicha etapa) se ejecutará la función FC10, que realizará una serie de conversiones a fin de obtener la referencia de caudal a enviar al Trovis, para implementar el control de relación de la mezcla.

5.3.2.5.1. IMPLEMENTACIÓN DEL LAZO DE CONTROL DE NIVEL

El software de programación Step7 proporciona una función predefinida que implementa un PID (FB41). Por lo tanto, es importante entender el esquema de bloques que el fabricante nos proporciona en su documentación (páginas 3-4 del manual PID Control, ref: C79000-G7078-C516-01) y así saber qué parámetros debemos introducir en la llamada a la función. En el Anexo A1 se puede ver el código fuente que se explica a continuación.

Como el control es continuo, se tendrá que poder realizar llamadas a FC11 cíclicamente, por lo que se utilizará un bloque de organización de ejecución cíclica (OB35, cada 100ms) para realizar la llamada.

Seguidamente se muestra el esquema de ejecución de esta parte del programa:

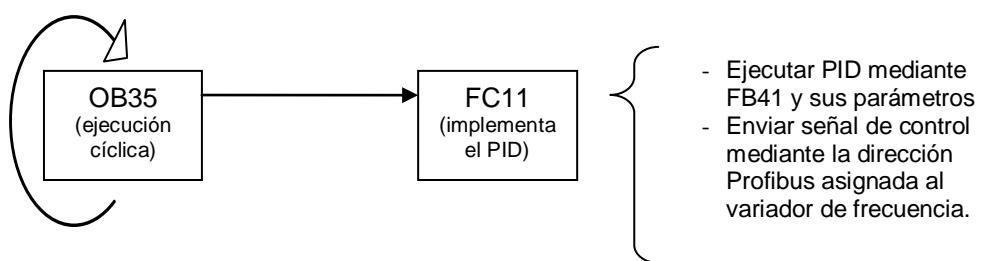


Figura 55: Esquema de la ejecución del control de nivel

Por último destacar que la comunicación del PLC con el variador se realiza mediante PROFIBUS. Tal y como se explicó en el apartado 3.5, se ha configurado el hardware (tanto PLC como variador) para implementar un PPO type3 consistent Word. Este tipo de PPO nos permite comunicar mandando solo las palabras necesarias en la dirección mapeada, sin necesidad de PCD. Así pues, siguiendo el ejemplo de la línea 1, en la dirección 256 se mandará el código de control, y en la 258 se mandará la referencia.

5.3.2.5.1. IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL RATIO

Teniendo configurado el regulador Trovis asociado a la línea 1 de producción, el programa del PLC realizará una lectura de caudal de la bomba 3, aplicará las conversiones expuestas en el esquema de la figura 56 para obtener el valor en unidades de caudal, realizará la multiplicación y, finalmente, volverá a convertir el valor encontrado en una señal de corriente para ser enviada al regulador Trovis.

El esquema de ejecución es el siguiente:

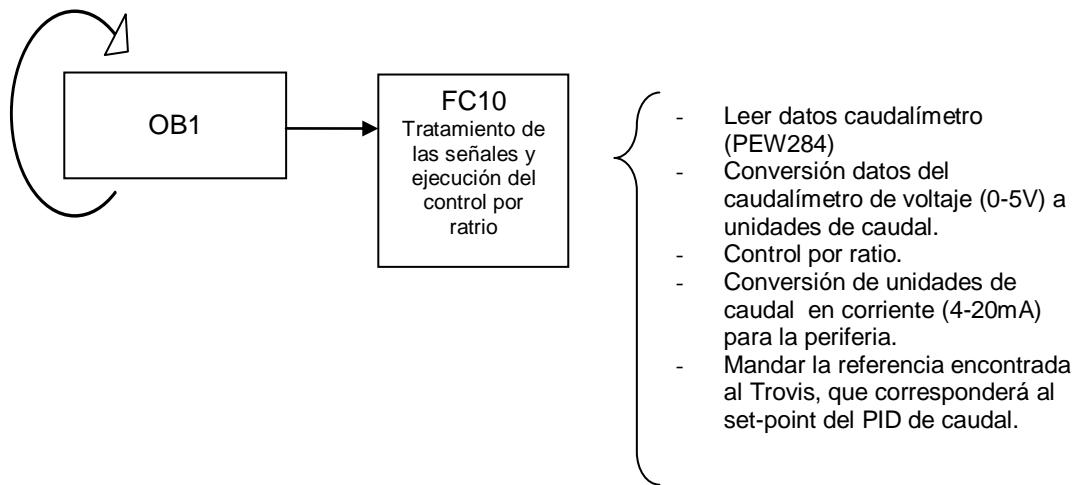


Figura 56: Esquema de la ejecución del control por ratio del PLC

Notar que en cada conversión de voltaje-caudal o de caudal-corriente, será necesario determinar la curva de funcionamiento de las bombas 3 y 4 (para conversión voltaje-caudal), y de las bombas 5 y 6 (para conversión caudal-corriente). Por lo tanto, se procede de la misma manera que se encontró el comportamiento de las bombas 1 y 2 en el apartado 5.2, haciendo funcionar dichas bombas a distintas velocidades y obteniendo las lecturas correspondientes al caudal proporcionado y al voltaje (o corriente) enviado por el caudalímetro. El resultado gráfico es el siguiente:

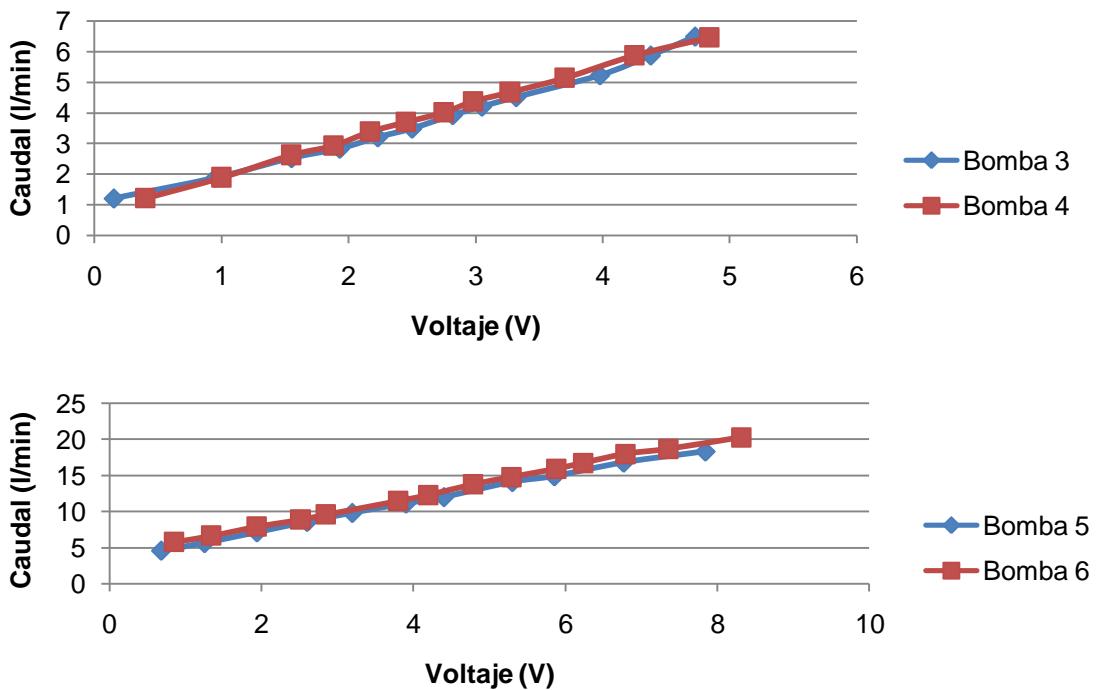


Figura 57: Gráficas del comportamiento de las bombas 3, 4, 5 y 6.

Se observa que el comportamiento de las cuatro bombas se puede aproximar linealmente. Por lo tanto, mediante el comando *Polyfit* de Matlab, se obtendrán las funciones de primer grado a utilizar a nivel de programación (conversión).

5.4. ETAPA DE EVAPORACIÓN

La evaporación es la primera operación del proceso, y su objetivo es el de producir uno de los componentes de la mezcla. En este apartado veremos los aspectos más importantes, tal y como se ha realizado en las otras etapas, desde dos puntos de vista:

- **Funcional**, en el que se describirá el funcionamiento de la etapa, desde la recogida de la materia prima, hasta la salida del componente de mezcla producido y su almacenamiento temporal en los buffers. Al tratarse de un proceso batch, también conoceremos los aspectos a tener en cuenta en cada tarea.
- **Control**, en el que se hablará de la instrumentación utilizada, de las señales de control que intervienen y del programa del PLC, que implementa la lógica de este proceso batch.

5.4.1. DESCRIPCIÓN FUNCIONAL DE LA ETAPA

Como se ha dicho, el objetivo de esta etapa será el de producir un componente de mezcla a partir de la materia prima. Tal y como se observa en la figura 58, dicha materia prima se encuentra, inicialmente, en un tanque de grandes dimensiones.

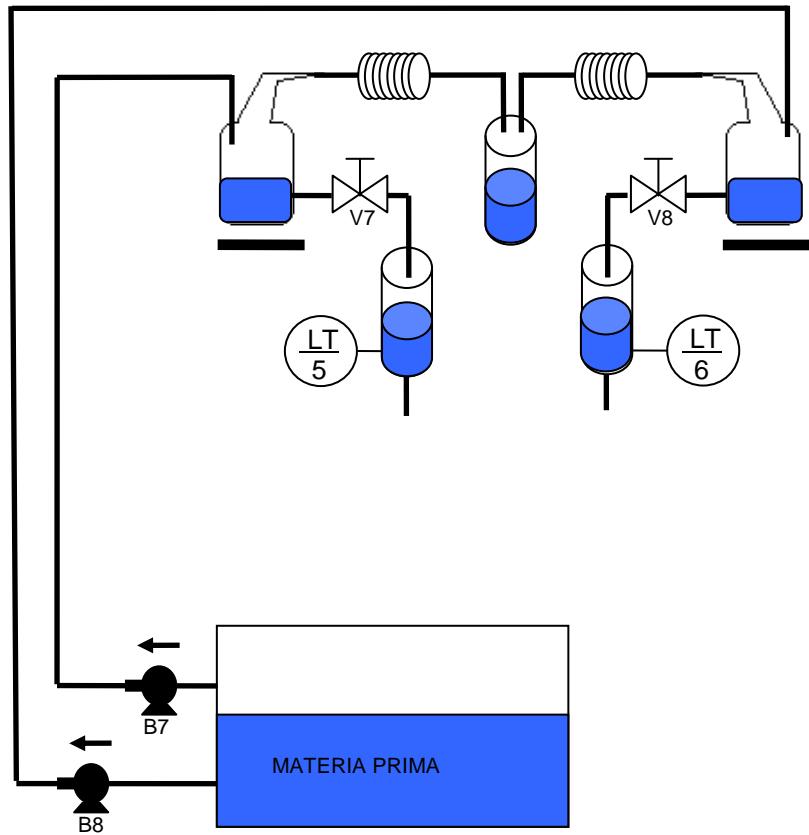


Figura 58: Esquema general de la etapa de evaporación

El proceso batch que se implementa en esta etapa implica la secuencialización de las siguientes tareas:

1. Carga de los evaporadores.
2. Evaporación.
3. Espera hasta la descarga.
4. Descarga de los evaporadores.

A continuación, se explicará con más detalle las cuatro tareas anteriores, especificando qué trabajo previo se requiere a nivel de instrumentación para poder realizar el control.

5.4.1.1. CARGA DE LOS EVAPORADORES

En esta tarea tendremos que hacer llegar la materia prima a los evaporadores mediante las bombas B7 y B8. Como no se dispondrá de ningún tipo de sensor para conocer con precisión el volumen de líquido cargado, se tendrá que realizar un proceso previo para obtener el comportamiento de las bombas, mediante el cual se conocerá el caudal que éstas proporcionan.

En concreto, el proceso que se realizará será parecido al que se explicó en el apartado 5.2.1.2, consistente en poner la bomba en funcionamiento durante cierto tiempo y realizar una lectura del caudal que ésta proporciona. En el caso anterior se realizaba dicho experimento para varias

velocidades de funcionamiento. Ahora bien, como las bombas 7 y 8 funcionan sólo a dos velocidades distintas (al 0% o al 100%), simplemente habrá que realizar el experimento una vez, tomando varias lecturas de caudal.

Seguidamente, se hará la media aritmética de los resultados obtenidos, y se trabajará, a nivel de programación, con la siguiente conversión:

$$volumen_evaporador = caudal_bomba \times tiempo$$

5.4.1.2. EVAPORACIÓN

Considerando que la materia prima que se carga en los evaporadores es una mezcla de dos componentes líquidos donde el más volátil constituye una impureza que se desea eliminar hasta cierto grado, esta tarea consistiría en calentar el líquido cargado en el evaporador mediante algún actuador adecuado (una manta calefactora en el caso del evaporador 1 y una resistencia eléctrica en el evaporador 2) durante un tiempo predeterminado (en función del volumen cargado) que permitiese evaporar hasta el grado deseado el componente volátil de la materia prima.

No obstante cabe comentar que, a pesar de que se dispone de la instrumentación y elementos de proceso adecuados (actuadores de calefacción, sensores de temperatura, serpentín y depósito de recogida del vapor), la evaporación como tal no se lleva a cabo en la planta piloto.

Por tanto, la tarea a realizar consiste simplemente en la espera durante un tiempo predeterminado, y así se ha considerado a todos los efectos en el diseño del sistema SCADA.

5.4.1.3. TIEMPO DE ESPERA HASTA LA DESCARGA

Hemos visto en el capítulo 3 que los dos requisitos de producción: cantidad de producto; calidad del producto; tienen una implicación directa con el caudal de salida del mezclador y con la relación entre los dos componentes de la mezcla, respectivamente. Esto implica que la etapa de evaporación deberá proporcionar una cantidad de producto generado por unidad de tiempo a la etapa de mezcla, pudiendo definir un ciclo de evaporado determinado, compuesto por el tiempo asociado a las cuatro etapas del proceso batch. Todas estas etapas, menos la que se está explicando, dependen del volumen de líquido que se desea cargar en los evaporadores. A más volumen cargado, más tiempo tardará cada etapa y mayor será el tiempo de ciclo de evaporado.

Por otro lado sabemos que el caudal de entrada que la etapa de mezcla exige a la de evaporación es:

$$Q_{\text{exigido}} = \frac{V_{\text{descargado}}}{T_{\text{CicloEvaporado}}}$$

donde $V_{descargado}$ es el volumen de líquido que sale del evaporador y $T_{CicloEvaporado}$ es el tiempo de ciclo de evaporación. Así pues, la tarea del tiempo de espera se ha creado a fin de cumplir la anterior igualdad en el caso que la etapa de evaporación (con tiempo de espera igual a 0) proporcionara un caudal mayor al exigido. En este caso, añadiendo el tiempo de espera preciso conseguiremos un tiempo de ciclo mayor y, en consecuencia, un caudal de salida de la etapa de evaporación menor al que se tenía, e igual al exigido.

En el apartado 6.2.2.1 está explicado con mayor detenimiento el valor de este tiempo que, como hemos visto, tendrá que ser mayor o igual a 0.

5.4.1.4. VACIAR LOS EVAPORADORES

Esta tarea básicamente consiste en abrir las electroválvulas 7 (u 8) durante el tiempo necesario para vaciar el componente resultante de la evaporación. Este tiempo dependerá del volumen de líquido que contenga el evaporador, y de la forma de éste.

Puesto que no se dispone de un sensor de nivel de los evaporadores, se tendrá que obtener empíricamente el comportamiento de vaciado de los evaporadores en función de la cantidad de líquido que contengan. Así, mediante un cronómetro, se tendrán que realizar varias lecturas de tiempo de vaciado para distintos volúmenes, a fin de conocer, mediante el comando *polyfit* de Matlab, una función que aproxime dicho tiempo.

5.4.2. CONTROL DE LA ETAPA

El control de esta etapa consiste básicamente en la secuencialización de las tareas explicadas anteriormente. Para ello, veremos la instrumentación que interviene, las señales de control que manipularemos, y el programa del PLC que implementa la lógica secuencial correspondiente.

5.4.2.1. INSTRUMENTACIÓN

A continuación se mostrarán los distintos elementos que intervienen en esta etapa y que se pueden observar en la figura 59.

Sensores (captadores)

Nivel (LT5 y LT6)

Fabricante: PEPPERL+FUCHS

Modelo: UB400-12GM-I-V1

Características principales: Proporciona la señal estandarizada.

Tipo: Ultrasónico.

Tipo de salida: 4-20mA.

Actuadores

Electroválvulas (V7 y V8)

Fabricante: M&M

Tipo: Todo abierto o todo cerrado (on/off).

Tipo de entrada: 220V AC

Bombas (B7 y B8)

Fabricante: FLOJET

Modelo: 4405-143

Características principales: caudal máximo de 11 l/min

Tipo de entrada: 12V DC

Elementos de procesoEvaporadores

Capacidad: 2 litros el de la línea 1 y 5 litros el de la línea 2.

Características: El evaporador 1 utiliza una manta térmica para calentar la materia, mientras que el evaporador 2 utiliza una resistencia eléctrica.

Tanques de almacenamiento temporal o buffers (uno para cada línea)

Capacidad: 3,5 litros.

Tipo: Polietileno.

Tanque de materia prima

Capacidad: 100 litros aprox.

Tipo: Polietileno.

Tubos

Características principales: Transportan el líquido.

Tipo: Silicona.

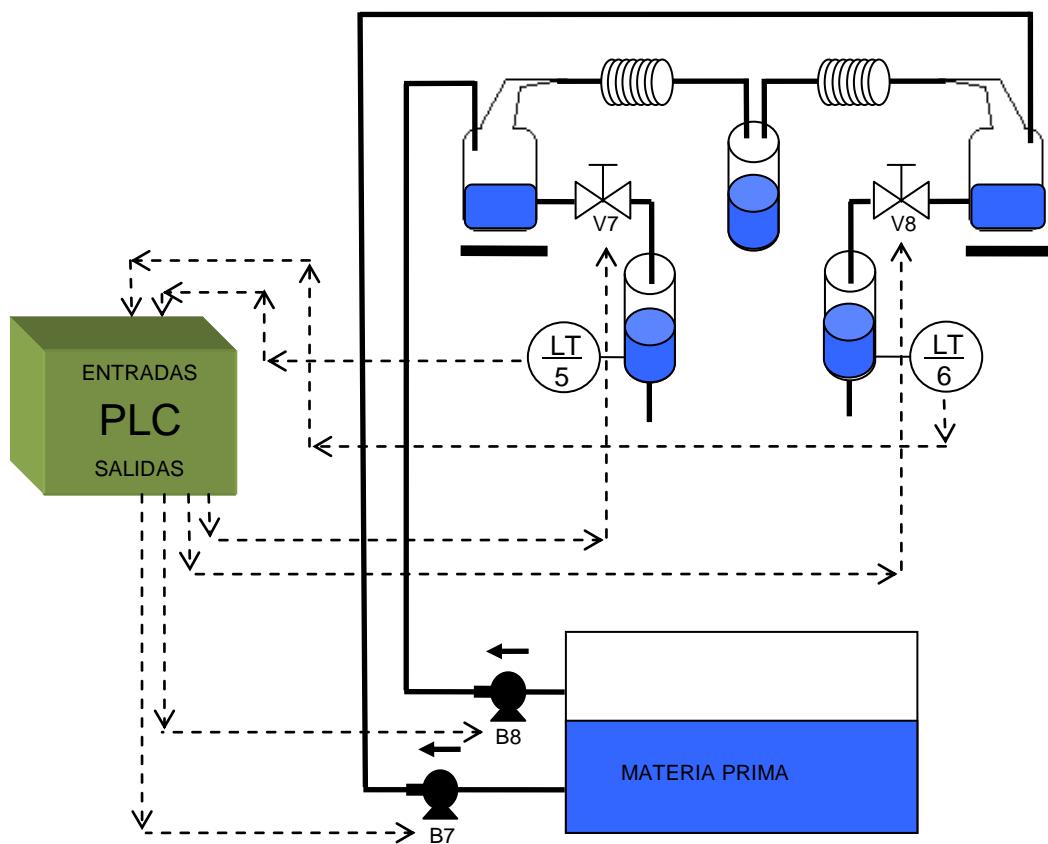


Figura 59: Esquema de control de la etapa de evaporación. Señales de control

5.4.2.2. SEÑALES DE CONTROL

Mirando la figura 59 se procederá, como en los apartados anteriores, a realizar una pequeña clasificación de las señales de control que intervienen en esta etapa:

SALIDAS independientes:

- Señal de control de las electroválvulas 7 y 8, voltaje 220AC.
 - Señal de control de las bombas 7 y 8, voltaje 0 o 12 V (on / off).

ENTRADAS al PLC

- Transmisores de nivel de los tanques de mezcla (LT3 y LT4), intensidad (4-20mA).
 - Transmisores de caudal FT3 y FT4, voltaje (0-5V)

5.4.2.3. PROGRAMA

La función asociada a esta etapa, en la línea de producción 1, corresponde a la función FC17, en la que se ha implementado un timer para cada tarea. El primero, mientras esté ejecutándose, se encargará de realizar la tarea de llenado de los evaporadores mediante la bomba 7. Una vez terminado, se pondrá en marcha el segundo timer (tarea de evaporado) y, posteriormente, el tercero (tarea tiempo de espera hasta la descarga). Ambos no llevarán asociados ninguna acción. Por último, se activará el cuarto timer que estará asociado a la tarea de vaciado de los evaporadores, permitiendo el vaciado de los evaporadores mediante la electroválvula 7.

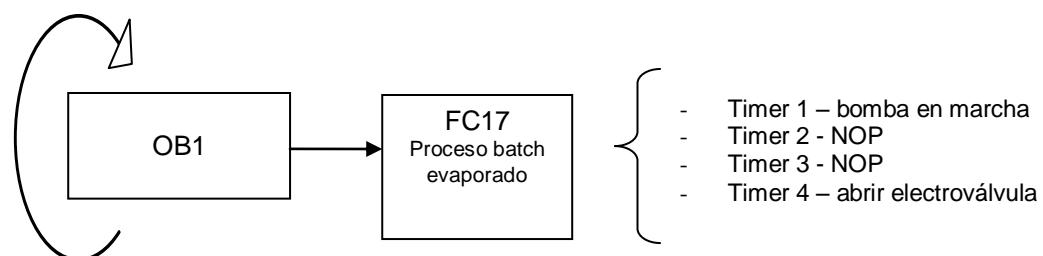


Figura 60: Esquema de la ejecución del programa de evaporado

6. DISEÑO E IMPLANTACIÓN DEL SISTEMA DE SUPERVISIÓN

En el nivel de supervisión, dentro de un entorno piramidal de automatización integrada, se requiere poder transferir al nivel de control ciertos valores que definan el comportamiento productivo de la planta. A su vez, se tiene que poder recibir información de las variables de proceso: valores anómalos de las variables de proceso podrán influir en un cambio de estado de la planta (i.e. nivel muy alto de un tanque implicará el paro de la planta).

Es por ello que surge la necesidad de crear aplicaciones software que sean capaces de transferir información en ambos sentidos, pudiendo visualizar, por un lado, las variables de la planta, y por otro, contribuir al control de la misma. Desde este punto de vista, típicamente, la capa de supervisión de un sistema SCADA permite:

- Para cada uno de los lazos de control implementados, definir y enviar a las unidades locales de control los valores de set-point, así como los parámetros de sintonía de los controladores.
- En relación al secuenciamento de operaciones, propio del control de procesos batch, u otros procesos secuenciales, definir y enviar a las unidades de control (en este caso típicamente PLCs) los valores de los parámetros que caracterizan la lógica secuencial implementada (i.e. valores de timers).
- Definir un modo de operación manual, en el que no sean los algoritmos de control implementados en las ULC, sino directamente el operador de planta quien asigne y envíe los valores de señal de control a los actuadores del proceso.

funcionalidades implementadas en este sistema que se explicará a continuación.

Así pues, en este capítulo se expondrán, primeramente, los objetivos del sistema de supervisión en base a los requerimientos funcionales deseados. Seguidamente se analizará cada ventana que compone la aplicación, realizando una explicación detallada de cada una.

6.1. OBJETIVOS DEL SISTEMA

La aplicación software que se implementará en este proyecto, tendrá que ser capaz de visualizar todas las variables del proceso de producción y de controlar ciertos aspectos sobre el funcionamiento de los actuadores y de la planta.

Por otro lado, es muy probable que en un futuro se produzcan modificaciones en la planta (i.e. adición de un nuevo lazo de control) o, simplemente, interesen distintos aspectos a visualizar (i.e. la creación de un gráfico histórico que permita visualizar el comportamiento de una variable a lo largo del tiempo). Así pues, el sistema deberá responder a una arquitectura abierta, con posibilidad de adaptación ante futuros cambios.

La sencillez de la aplicación es otro punto importante a tener en cuenta. Habrá que realizar un interface amigable con el usuario y fácil de utilizar, tratando de realizarlo de manera que el operario que lo maneje no necesite tener conocimientos avanzados de software industrial.

Particularmente, la aplicación cumplirá los siguientes requerimientos funcionales propios de la planta del proyecto:

- Mostrar una visión general (sinóptica) de la planta.
- Permitir dos modos de funcionamiento: manual / automático.
- Visualización clara del estado de funcionamiento de los actuadores.
- Visualización de las variables de proceso: niveles de los tanques y caudales.
- Envío de consignas de producción proporcionadas por el nivel de planificación de la producción.
- Gestión de los lazos de control implementados en el PLC.
- Visualización y reconocimiento de alarmas.

6.2. ESTRUCTURA DEL SISTEMA

La estructura de la aplicación creada está formada por cuatro ventanas principales, de las cuales dependerán otras secundarias:

- Ventana general: se mostrará el esquema completo de la planta.
- Ventana de producción: servirá para introducir valores de producción.
- Ventana de alarmas: gestionará las alarmas.
- Ventana de consignas: gestionará valores de set-point y parámetros de sintonía de los lazos de control.

Las ventanas secundarias serán de error o de soporte a la principal. Se explicarán junto a las ventanas principales de que dependan, en los subapartados que prosiguen.

Cabe destacar que cada elemento, dibujado en cualquier ventana, tiene asociado una variable que, en InTouch, recibe el nombre de Tag. Dicho tag puede ser un tipo de dato real, de punto flotante, entero, discreto, etc., y estar asociado a una variable de Entrada/Salida (mediante el servidor OPC) o, simplemente, ser un registro de memoria útil para programar determinadas rutinas. No existirá elemento dibujado sin un tag asociado.

Existe una ventana que estará presente en todo momento: la ventana de Barra de Navegación, mediante la cual se podrá navegar por las cuatro pantallas principales mediante los botones dispuestos.

6.2.1. VENTANA GENERAL

La idea gráfica de esta ventana es poder ver la planta al completo, siendo una extensión del esquema general de la planta (figura 11), en el que los elementos, en lugar de estar dibujados

de manera estandarizada, están dibujados recalcando las características propias de cada uno. Por ejemplo, las bombas peristálticas en la realidad son de color naranja, mientras que las Flojet son negras, y así se ha reflejado en esta pantalla. Otro aspecto a destacar es el sistema de cinta transportadora de botellas, el cual simula el sistema de noria implementado en realidad.

Funcionalmente, esta ventana dará la posibilidad de que la planta trabaje en dos modos distintos: manual o automático. Cada modo tendrá asociadas sus características que se expondrán en el apartado 6.2.1.1.

La figura siguiente muestra la ventana general de la aplicación:

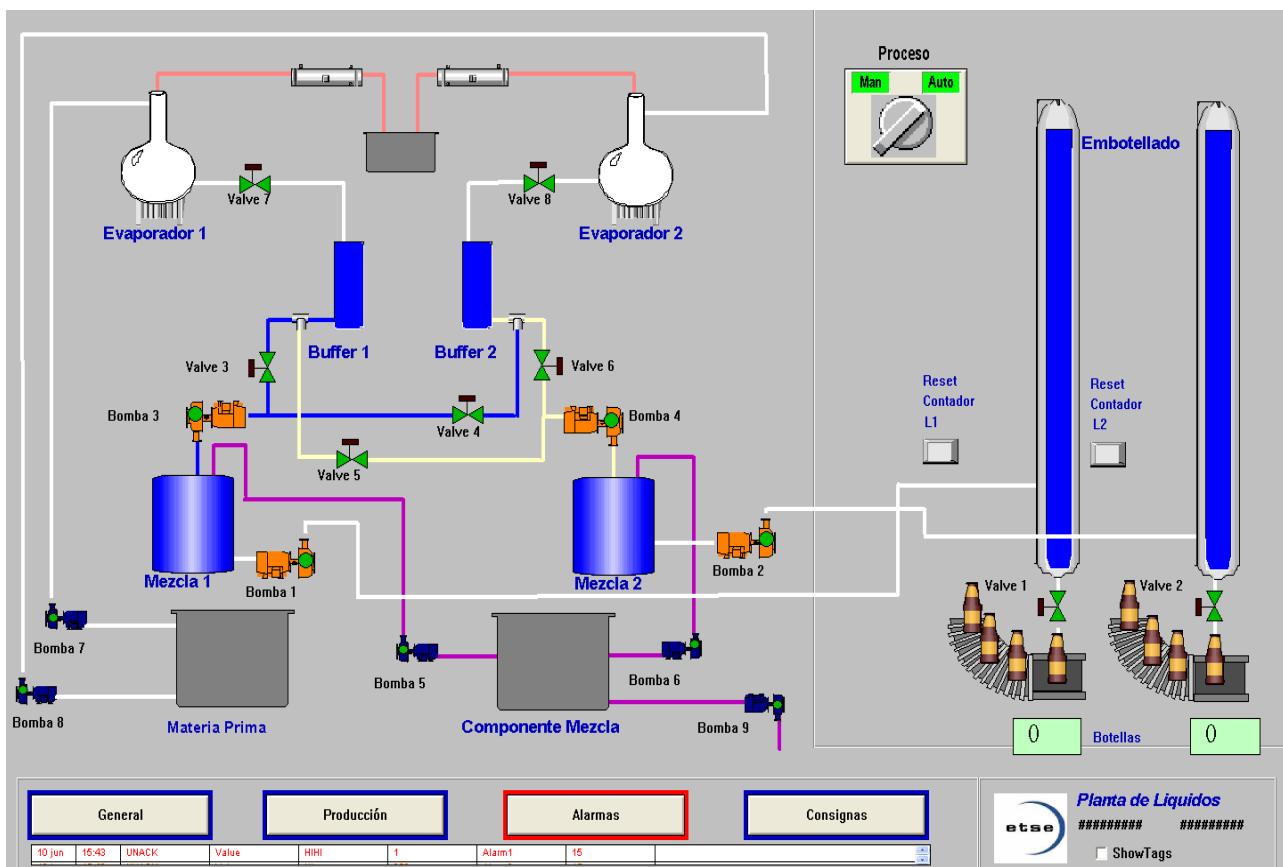


Figura 61: Ventana general

6.2.1.1. CARACTERÍSTICAS FUNCIONALES

Mediante esta ventana se podrá poner a funcionar la planta en dos modos distintos: manual o automático. La selección se hará mediante el selector dispuesto en la parte alta de la pantalla bajo el nombre de *proceso*.

- En modo **automático**, la planta responderá tal y como se ha expuesto en el capítulo 5 de esta memoria, distinguiendo las tres etapas de cada línea, y respondiendo al proceso asociado a cada una de ellas.

- En modo **manual**, la planta no responde a ningún tipo de control. Será el operador quien, bajo su responsabilidad, intervendrá sobre los actuadores a fin de lograr sus propósitos. Éstos pueden ser: llevar el proceso productivo a un estado inicial conocido, solucionar un problema de alarmas, etc... La manipulación de las señales de control se tratará en el apartado 6.2.1.2, puesto que dependerá de las características del interface creado.

Cada cambio en el modo de funcionamiento llevará consigo cierta lógica programada en InTouch. Esta lógica está pensada para cumplir con las características funcionales de cada modo.

- En la transición **de automático a manual**, se tendrán que parar todos y cada uno de los actuadores en funcionamiento, llevando el proceso a un estado de paro total. Esto se ha conseguido mediante una rutina que se ejecuta solamente una vez, cuando se produce el cambio de automático a manual, que envía las señales de control de las etapas en funcionamiento a 0, al igual que las señales de los actuadores de toda la planta. Anulando las señales de control de las etapas, se consigue que el PLC no haga ninguna llamada a las funciones que cada etapa tiene asociada. Anulando las señales de los actuadores, se consigue que todos ellos se paren, asegurando que la planta no quede en un estado desconocido. Una vez ha terminado la ejecución de dicha rutina, ya se tendrá la planta funcionando en modo manual.
- En la transición **de manual a automático**, el proceso consistirá en ejecutar una rutina que, como en el caso anterior, se ejecute una vez cuando la variable del selector cambie de manual a automático, en la que se compruebe si desde la ventana de producción hay algún *camino*¹⁶ activo (cada camino tendrá asociado una variable –tag– de InTouch). En caso afirmativo, se activan las señales de control de las etapas y de la electroválvula que conforman el camino. En el caso que no hubiera ningún camino activo, la planta estaría funcionando también en modo automático puesto que no se podría actuar directamente sobre los elementos actuadores de la planta y, por lo tanto, se tendría que esperar a que el operario validara un camino.

Por otro lado, se ha dispuesto de unos contadores de botellas envasadas, uno para cada etapa de embotellado, que servirán para tener un control de las botellas que cada línea produce. Cada contador podrá ser reseteado mediante el botón de reset. Este dato podrá ser útil a efectos de la planificación de la producción.

Por último, cuando la planta esté funcionando en modo automático, se podrá gestionar la información asociada a los controladores PID de los lazos de control de nivel. Mediante un clic

¹⁶ Por camino se entiende que el operario haya seleccionado una etapa de evaporación, una de mezcla, una de embotellado, y una de las cuatro electroválvulas (EV3, EV4, EV5 o EV6) de conexión entre las etapas de evaporado y mezcla con sentido. Estos aspectos se recogen en el apartado 6.2.2.

encima de las bombas 3 y 4 aparecerá una ventana que permitirá tal funcionalidad. Dicha ventana se explicará en el apartado 6.2.1.3.

6.2.1.2. CARACTERÍSTICAS DEL INTERFACE

A nivel de actuadores distinguiremos entre dos tipos de elementos:

- Con la señal de control discreta.
- Con la señal de control numérica.

Los primeros serán todas las electroválvulas, la cinta transportadora (simulación de la noria), las bombas Flojet B7, B8 y B9 (de color negro) y los botones de reset de los contadores. En el segundo grupo se encontrarán las bombas peristálticas Watson Marlow (naranjas). Una vez expuesto el tipo de señal de control de cada actuador, se distinguirá entre los dos modos de funcionamiento para explicar las características de visualización de estos instrumentos y, por lo tanto, la manera de interactuar en la planta mediante el interface creado.

Cuando el sistema funcione en modo automático la capacidad de actuación manual sobre actuadores y elementos de la planta por parte del operador de planta queda restringida a lo siguiente:

- Las bombas 1 y 2, que determinan el caudal de salida de los tanques de mezcla (requisito de volumen de producción). Mediante un clic encima de su dibujo se abrirá un pequeño cuadro numérico, en el que se introducirá un valor en porcentaje (0 a 100).
- Las bombas 3 y 4, que son los actuadores de los lazos de control de nivel de los tanques de mezcla. Haciendo un clic encima de estas bombas se abrirá una ventana secundaria, que nos permite modificar los parámetros que determinan las características de funcionamiento de los controladores PID de estos lazos. La funcionalidad de esta ventana se explicará con detalle en el apartado 6.2.1.3.
- El botón de reset podrá ser manipulado en cualquier momento. Mediante un clic, el contador que dicho botón tiene asociado se pondrá a cero.

En modo manual el operador podrá manipular todos los elementos mostrados en la ventana, de la siguiente manera:

- Los elementos controlados por señales discretas se activan haciendo un clic encima de ellos. Se desactivarán de la misma manera las electroválvulas y las bombas Flojet, mientras que las norias y los botones de reset funcionan a pulsos.
- En los elementos cuya señal de control sea numérica, se tendrá que clicar encima para que aparezca el cuadro numérico. En él se introducirá un porcentaje de funcionamiento (0-100).

Observar que en las bombas 3 y 4 no aparecerá la ventana secundaria, puesto que en modo manual se desactivan los PID de los lazos de control de nivel. Sí se ejecutará el control ratio si las bombas 3 y 4 se ponen en funcionamiento. Esta decisión ha sido

adoptada por nosotros ya que las bombas 5 y 6 no se pueden manipular ni en manual ni en automático, puesto que su funcionamiento lo controlan los reguladores Trovis.

Por último, un aspecto de visualización que no se ha tratado es que la mayoría de los elementos actuadores poseen un piloto indicador. Éste estará de color verde siempre que el instrumento en cuestión esté activo o funcionando. En caso contrario se pondrá de color rojo. Las norias no disponen del piloto indicador. Está simbolizado su funcionamiento mediante una cinta transportadora y una serie de botellas dispuestas encima de ésta, creando un efecto de movimiento al activarse la noria.

6.2.1.3. VENTANAS SECUNDARIAS

Tal y como se ha comentado en apartados anteriores, las bombas 3 y 4 funcionando en modo automático tendrán asociada una ventana secundaria como la que se muestra a continuación:

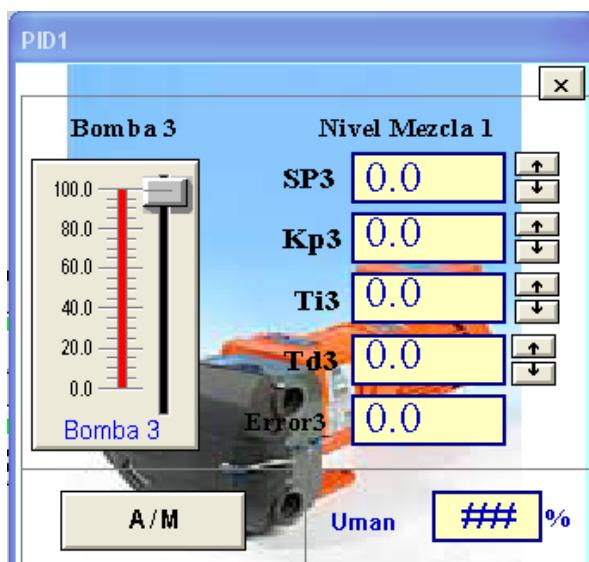


Figura 62: Ventana secundaria PID1

En ella se podrán gestionar todos los parámetros referentes al lazo de control de nivel de los tanques de mezcla, como el set point y los valores correspondientes a las acciones PID, y se podrá visualizar el error existente y la acción sobre la bomba que el algoritmo produce.

Por último, mediante el botón A/M, se podrá cambiar el modo de funcionamiento del lazo. En manual aparece el cuadro numérico Uman, en el que se introducirá un porcentaje de funcionamiento para la bomba 3.

Para el lazo de control de la otra línea existe una ventana idéntica a la anterior. En el apartado 6.2.4.1 se analizarán con más detenimiento los campos de estas pantallas desde un punto de vista funcional.

6.2.2. VENTANA DE PRODUCCIÓN

Gráficamente, la ventana tiene dos zonas diferenciadas. En la superior se ha dividido el proceso de la planta en cuatro partes interconectadas por las electroválvulas de conexión entre las etapas de evaporación y mezcla:

- Celda de evaporado de la línea 1 y 2, formada por la etapa de evaporación.
- Celda de llenado de la línea 1 y 2, formada por las etapas de mezcla y embotellado.

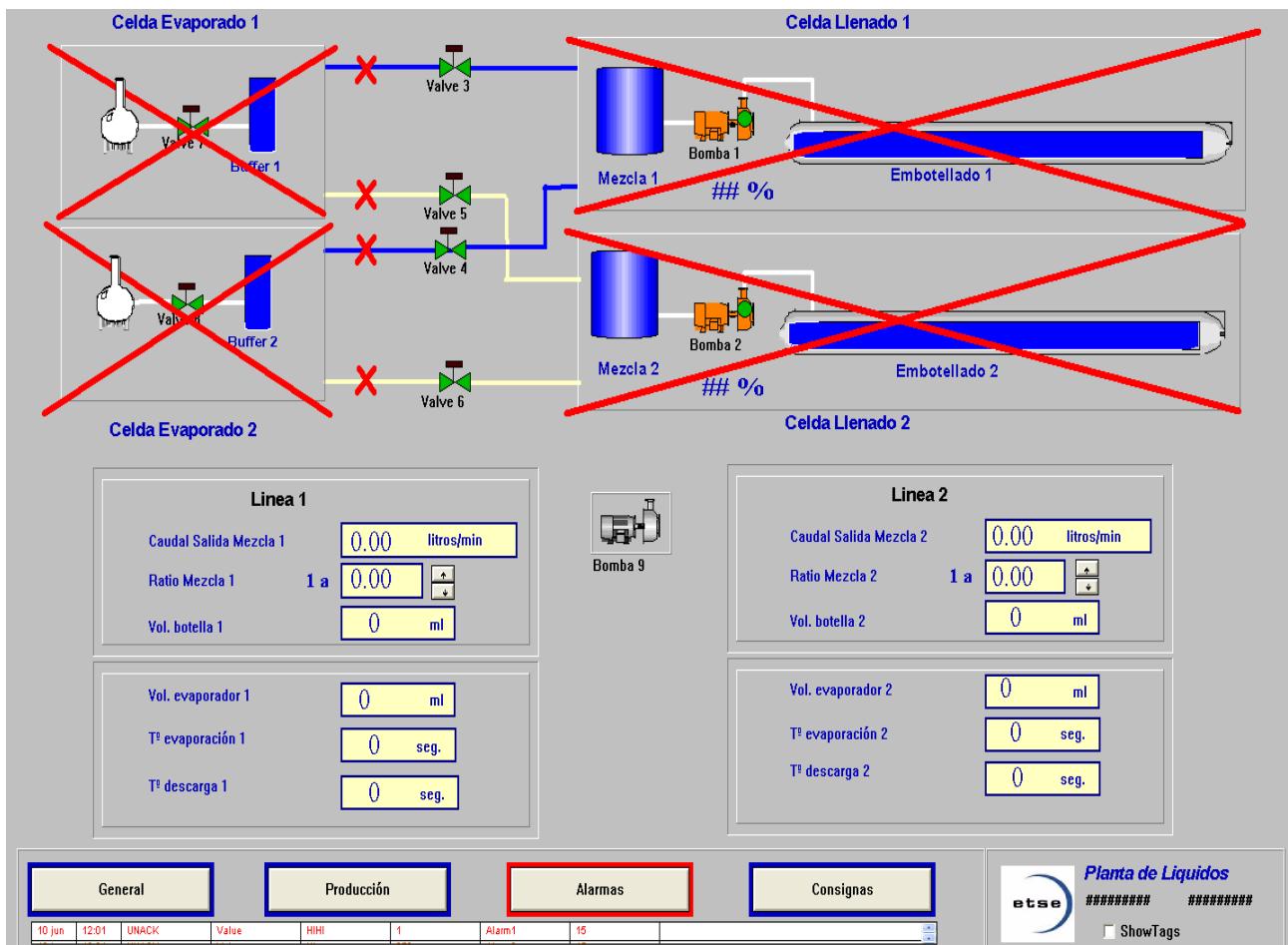


Figura 63: Ventana de producción

En la zona inferior estarán dispuestos una serie de cuadros de texto que marcarán aspectos productivos de cada línea.

Funcionalmente, la ventana se utilizará para poder transmitir al nivel de control (al PLC) valores de producción que definan el comportamiento de la planta en base a unas restricciones que se expondrán a continuación.

6.2.2.1. CARACTERÍSTICAS FUNCIONALES

Un aspecto importante de la planta será definir qué líneas productivas deberán funcionar. Mediante la zona gráfica de esta ventana se podrá indicar este aspecto, pero antes se exigirá

que se hayan indicado todos los parámetros que se exigen en la zona inferior de la ventana. Por ejemplo, si se quiere poner en marcha la línea 1, primeramente hay que introducir los valores de producción correspondientes a las celdas que intervienen (celda de evaporado 1 y celda de llenado 1) para, posteriormente activar dichas celdas, así como la electroválvula que marcará el camino de la materia. Esta idea funcional estará presente para cualquier camino productivo posible y se deberá cumplir en la aplicación SCADA.

Para conseguir esta funcionalidad se ha tenido que programar una serie de rutinas que se explican a continuación:

- La **rutina asociada a la zona gráfica** de la ventana, comprobará que el camino que el operario haya marcado sea lógico y que los valores productivos de las celdas que intervienen no sean incoherentes. Si lo fuesen, aparecería una ventana secundaria de error, que se explicará en el apartado 6.2.2.3.

La idea a la hora de programar la rutina es asignar un tag lógico a cada celda y electroválvula. Si en el cambio de estado de alguna de estas variables se produce un camino lógico se activará el tag asociado a éste. De esta manera se tendrá constancia de los caminos activos a efectos de trabajar en modo automático.

- En la **zona numérica de la ventana**, existen varias rutinas básicas que realizan distintas tareas. Seguidamente se muestra un listado del significado de cada valor de producción y su repercusión en el sistema.

- **Caudal Salida Mezcla:** Mediante las fórmulas que definen el comportamiento de las bombas 1 y 2, se convierte el valor de este parámetro a un porcentaje de funcionamiento de la bomba. Cuando el camino donde intervenga B1 esté activo y el modo de funcionamiento sea automático, dicha bomba funcionará a un determinado porcentaje equivalente al valor de caudal introducido.
- **Ratio de mezcla:** Este valor se enviará directamente al PLC sin necesidad de ejecutar ninguna rutina.
- **Volumen botella:** Se ejecutará una rutina de conversión de unidades, ya que se deberán introducir en mililitros y, el PLC, está programado para recibir litros.
- **Volumen evaporador:** Define la cantidad de líquido que debe entrar en los evaporadores. Para ello se conoce el caudal que proporcionan las bombas 7 y 8, así que la rutina simplemente convertirá el volumen en tiempo que deberá estar abierta la bomba en cuestión.
- **Tiempo de evaporación:** Valor proporcionado por la planificación de la producción que define el tiempo que la materia deberá estar procesándose. Se enviará directamente al PLC.
- **Tiempo de descarga:** A partir del volumen del evaporador, se calcula, mediante la fórmula de vaciado asociada (comentada en el apartado 5.4.1.4), el tiempo que la electroválvula deberá estar abierta para descargar completamente la materia del evaporador.

- La rutina asociada al cálculo del tiempo de espera, obtendrá dicho valor a partir de la fórmula obtenida de la siguiente manera:

- Sabiendo que el tiempo de ciclo de evaporado (TCE) es una composición de los tiempos que dura cada etapa del evaporado, obtenemos la siguiente igualdad:

$$TCE_V = T_{LL} + T_P + T_E + T_V$$

- Según la definición de caudal, también podemos definir TCE_V como:

$$TCE_V = \frac{V_{EV}}{Q_{EV}}$$

Obteniendo la siguiente igualdad:

$$T_{LL} + T_P + T_E + T_V = \frac{V_{EV}}{Q_{EV}}$$

Dónde V_{EV} es el volumen de materia prima cargada en el evaporador, y Q_{EV} es el caudal medio que deberá proporcionar a la etapa de mezcla.

- Despejando de la ecuación anterior T_E obtenemos:

$$T_E = \frac{V_{EV}}{Q_{EV}} - (T_{LL} + T_P + T_V)$$

- En este punto quedará por determinar Q_{EV} . Sabemos que la etapa de evaporado tiene que proporcionar el caudal que le imponga la etapa de mezcla, que a su vez, dependerá del caudal que proporcione ésta a la etapa de embotellado (caudal de salida del tanque de mezcla), que determinará el ritmo de producción. Este último caudal estará compuesto por la suma de dos caudales en una proporción conocida (por cada “unidad” de caudal de la etapa de evaporación, habrán r “unidades” de caudal del componente de mezcla). Para conocer el valor de una “unidad” de caudal, es decir, del caudal que debe proporcionar la etapa de evaporación a la mezcla, utilizaremos la siguiente ecuación:

$$Q_{EV} = \frac{Q_{OUT_MEZ}}{1 + r}$$

Donde Q_{OUT_MEZ} es el caudal de salida de los tanques de mezcla que, recordemos, será una consigna de producción.

- Así pues, la formula final que determina si hay o no hay tiempo de espera es la siguiente:

$$T_E = 60 \cdot \frac{V_{EV}}{\frac{Q_{OUT_MEZ}}{1 + r}} - (T_{LL} + T_P + T_V)$$

Notar que el número 60 es un factor de conversión de unidades, puesto que se trabajará en segundos.

Una vez aplicada la fórmula, la rutina decidirá si hay tiempo de espera o no en función del resultado obtenido. Si éste es negativo, significará que la etapa de evaporación no podrá abastecer a la de mezcla. Si es igual a 0, significa que no se necesita tiempo de espera. Finalmente, si es positivo, se enviará al PLC dicho valor.

6.2.2.2. CARACTERÍSTICAS DEL INTERFACE

El hecho más importante a nivel de visualización serán las “equis” en rojo, encima de cada celda y electroválvula. Servirán para que el operario sepa qué camino productivo seguirá la materia y tendrán repercusión a nivel lógico, es decir, la selección de los elementos que tenían equis producirán caminos lógicos y la activación de éstos. Si se está trabajando en modo automático, servirán para poner en funcionamiento las etapas implicadas.

Por otro lado, los elementos que salen en esta pantalla poseen las mismas características de visualización descritas en el apartado 6.2.1.2.

6.2.2.3. VENTANAS SECUNDARIAS

Esta pantalla tiene asociada una ventana secundaria de error, que aparece siempre que se haya seleccionado un camino y que exista algún valor de producción incoherente asociado a dicho camino. La ventana es la siguiente y sólo dispone de un mensaje de texto:



Figura 64: Ventana secundaria Fallo Rellenar

6.2.3. VENTANA DE ALARMAS

A nivel gráfico, el software InTouch ya proporciona un objeto de alarmas como el mostrado en la ventana siguiente. En él se distinguirán dos niveles de alarmas y todos los eventos que se produzcan mediante colores en el texto. Además, se ha añadido un botón de reconocimiento de alarmas en la parte derecha.

A nivel funcional, esta ventana servirá para visualizar todas las alarmas de nivel sin reconocer, así como los eventos que se produzcan. Hasta que los valores que han hecho saltar las alarmas no vuelvan a la normalidad, no desaparecerán de la tabla.

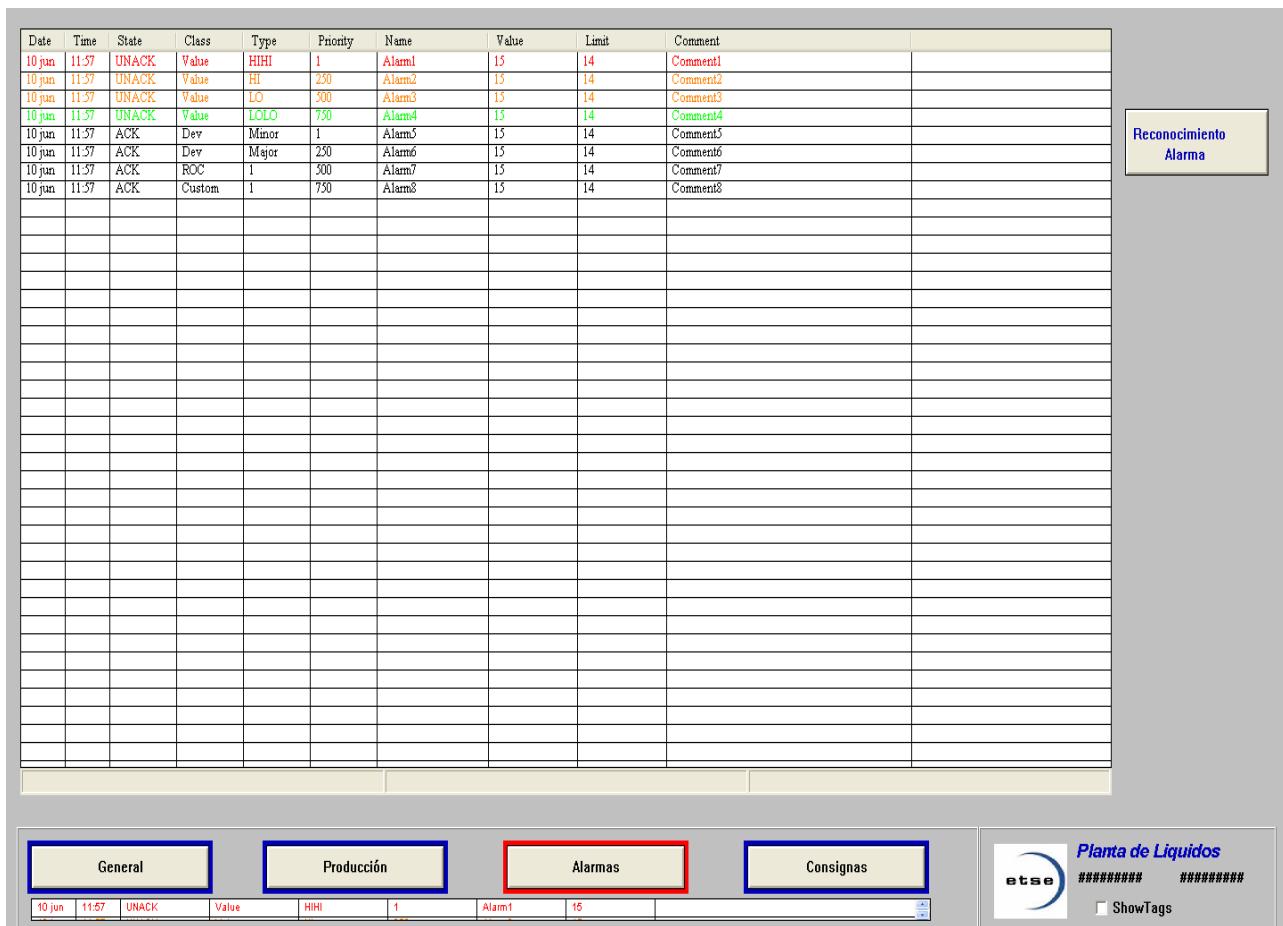


Figura 65: Ventana de Alarms

6.2.3.1. CARACTERÍSTICAS FUNCIONALES

Tal y como se ha comentado, esta ventana se utilizará para la visualización y reconocimiento de alarmas de nivel, y para solucionar el valor anómalo de la variable de proceso que ha provocado que la alarma salte.

La visualización se ha implementado mediante el objeto que el software InTouch proporciona, definiendo dos niveles de alarmas:

- Nivel de prioridad media:** El texto aparecerá en color naranja e indicará que la variable de nivel ha llegado a un valor alto, pero no crítico. Es responsabilidad del operario efectuar alguna acción sobre la planta para solucionar el problema. Este nivel de alarma no llevará consigo ninguna rutina asociada, puesto que se considera que aún hay margen de maniobra.
- Nivel de prioridad alta:** El texto aparecerá en color rojo e indicará que la variable de nivel ha llegado a un valor crítico. En este caso, se ejecutará una rutina que pondrá la planta en un estado de paro total, es decir, la planta se para y pasa a funcionar en modo manual, garantizando que el nivel del tanque o tanques en cuestión no desborde.

Cuando el operario haya solucionado el problema (no exista alarma de prioridad alta) ya se podrá volver a poner la planta en marcha en modo automático.

El reconocimiento de las alarmas se realizará haciendo clic en el botón *Reconocimiento alarma* situado en la parte derecha de la pantalla. Seguidamente aparecerá una ventana secundaria tipo *Pop up* como la mostrada y explicada en el apartado 6.2.3.3, mediante la cual se podrá reconocer una alarma en concreto o un grupo de alarmas, tal y como indica el árbol jerárquico mostrado.

Una vez reconocida la alarma, se cerrará la ventana secundaria y se podrá observar que, en la tabla del objeto alarma, el color del texto que indicaba la prioridad ahora ha cambiado a color gris. Dicho texto seguirá presente hasta que el valor de alarma vuelva al rango normal de trabajo.

6.2.3.2. CARACTERÍSTICAS DEL INTERFACE

Esta ventana posee varias características de visualización, puesto que una alarma es un hecho a destacar para que el operario se dé cuenta de que algo fuera de lo común está ocurriendo en la planta.

Tal y como se ha comentado en el apartado 6.2 existe una ventana que está presente en todo momento: la Barra de Navegación. En el botón asociado a la ventana de alarmas, se ha introducido un rectángulo rojo que lo envuelve. Si no hay alarma, el recuadro aparecerá de color azul, como en los demás casos. Si hay, aparecerá parpadeando indicando al operario que se ha producido una incidencia. En la zona inferior de esta ventana aparece la última alarma (o evento) que se ha producido.

En cuanto al botón de reconocimiento, se ha operado de una forma similar; es decir, si se produce una alarma, el texto del botón aparecerá parpadeando.

6.2.3.3. VENTANAS SECUNDARIAS

En esta ventana se muestra un árbol jerárquico que distingue tres grupos de alarmas: los referentes a los tanques de embotellado, de mezcla y de evaporación; obteniendo un total de seis tanques que disponen de alarma de nivel. Si no se produce alarma, el indicador de cada tanque, así como del grupo al que pertenece, aparecerá de color verde. Si se produce alarma, el indicador, tanto del tanque como del grupo, aparecerá de color rojo.

Para reconocer la alarma simplemente habrá que realizar un clic encima del botón en cuestión. En el caso de que sea un grupo de alarmas, todos los indicadores que pertenezcan a éste se reconocerán a la vez.

Seguidamente se muestra la ventana secundaria que hemos llamado Jerarquía.

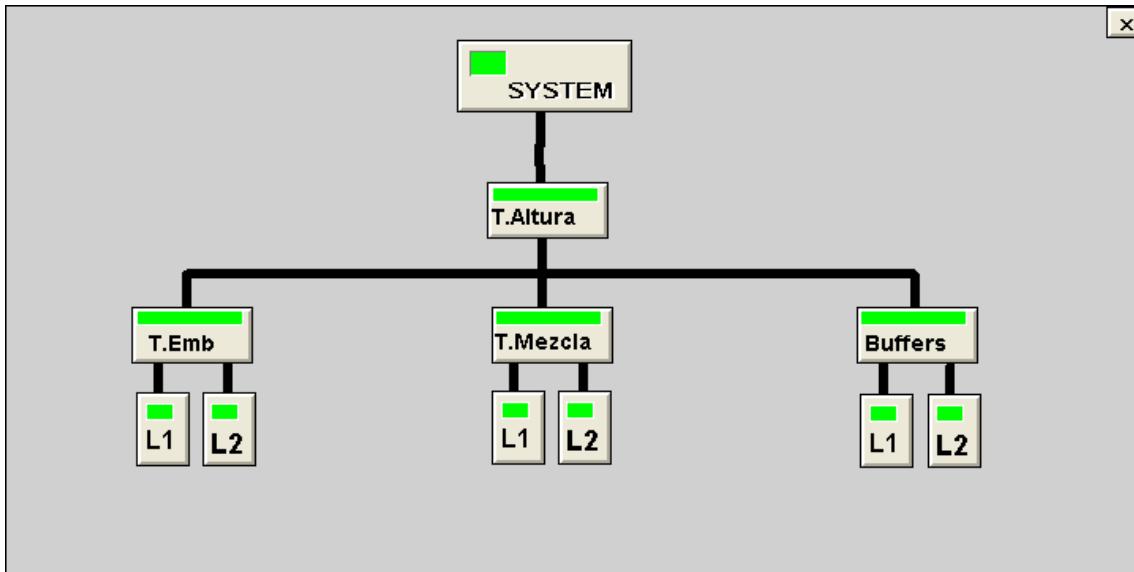


Figura 66: Ventana secundaria Jerarquía

6.2.4. VENTANA DE CONSIGNAS

Gráficamente, la ventana está distribuida en tres zonas:

- **Superior:** encontramos las consignas de las etapas de embotellado.
- **Central:** encontramos las consignas de las etapas de mezcla.
- **Inferior:** encontramos las consignas de las etapas de evaporación que, en este caso, vendrán impuestas por el volumen cargado indicado en la ventana de producción.

Funcionalmente, esta ventana servirá para introducir las consignas de las etapas de embotellado, gestionar los lazos de control de la etapa de mezcla, visualizar la relación de caudal que se produce, y visualizar el tiempo que las bombas 7 y 8 estarán activas para cargar el volumen indicado.

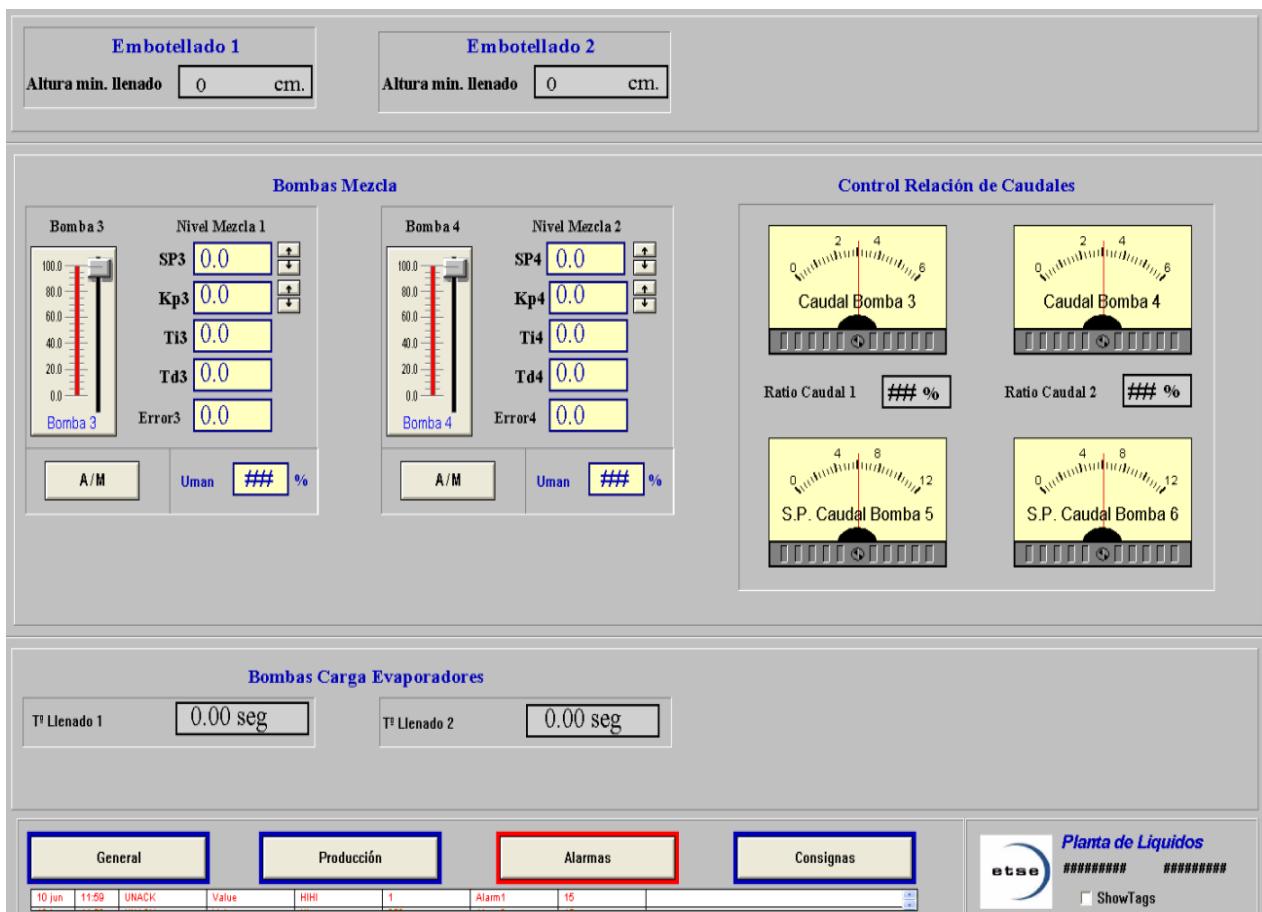


Figura 67: Ventana Consignas

6.2.4.1. CARACTERÍSTICAS FUNCIONALES

En la zona de la pantalla referente a la etapa de embotellado se introducirá un valor mínimo de altura que tiene que haber en los tanques de embotellado, a partir del cual la planta puede empezar a embotellar. Dicho valor se introducirá en centímetros, y posteriormente, mediante lógica programada, se convertirá este valor a metros para poder enviarlo al PLC, puesto que éste está programado para trabajar con estas unidades.

En la zona central están representados dos aspectos referentes a la etapa de mezcla. Por un lado se podrá interferir en el modo de funcionamiento de los lazos de control de nivel mediante dos frames idénticos a la ventana secundaria PID1. Los campos son los siguientes:

- **SP:** Se introducirá un valor de set point mediante el cuadro numérico o las flechas. Éstas incrementan o decrementan en 0,5 unidades el valor existente en el cuadro, que estará comprendido en un rango de 0 a 20.
- **KP:** Se introducirá un valor de constante proporcional mediante el cuadro numérico o las flechas. Éstas, como en el caso anterior, incrementan o decrementan en 0,5 unidades el valor existente en el cuadro. En este caso el valor nunca podrá ser negativo.

- **TI:** Se introducirá un valor de constante integradora mediante el cuadro numérico. El valor mínimo será 0 seg.
- **TD:** Se introducirá un valor de constante derivativa mediante el cuadro numérico. El valor mínimo será 0 seg.
- **Error:** Se visualizará el valor de error enviado por el PLC de manera continua.
- **Bomba:** Mediante la barra indicadora, se visualizará la actuación del lazo de control sobre la bomba en cuestión.
- **A/M, Uman:** Clicando sobre el botón A/M se cambiará el modo de funcionamiento del lazo de control de nivel. En automático el PID actuará sobre la bomba y permanecerá oculto el campo Uman. En modo manual, aparecerá dicho campo, en el que se tendrá que introducir un valor en porcentaje de funcionamiento para la bomba en cuestión.

Notar que se puede interferir en los mismos campos y de la misma manera mediante las ventanas secundarias PID1 y PID2.

Por otro lado, en la parte derecha están representados los valores reales de caudal de las bombas 3 y 4, y los valores de caudal de set point enviados al regulador Trovis. No se puede representar el valor de caudal real de las bombas 5 y 6 ya que son gobernadas por dicho regulador y su señal de control es ajena al PLC; el regulador industrial no se comunica con el PLC, simplemente recibe de éste la señal analógica de set-point.

Por último, en la parte inferior los valores dependen directamente del volumen de líquido que se haya indicado en la ventana de producción, a cargar en los evaporadores. Así pues, este último valor no se podrá introducir, simplemente estará representado a nivel de información.

6.2.4.2. CARACTERÍSTICAS DEL INTERFACE

La ventana de consignas presenta una distribución de elementos dispuestos en tres zonas claramente diferenciadas, ya comentadas en los apartados anteriores.

Como hecho diferencial de visualización encontramos los siguientes elementos:

- Barra indicadora del porcentaje de funcionamiento de las bombas, que marca la acción del PID sobre la bomba llenando la barra de color rojo y moviendo el indicador de la derecha al mismo nivel.
- Indicadores de caudal, que mediante las agujas indican el valor.

7. CONCLUSIONES

Este capítulo está distribuido en tres apartados, en los que se expondrán:

- Los objetivos cumplidos y no cumplidos.
- Las conclusiones obtenidas una vez realizado el proyecto.
- Los posibles trabajos futuros.

7.1. OBJETIVOS CUMPLIDOS Y NO CUMPLIDOS

En primer lugar podemos decir que, a pesar de las dificultades propias de un proyecto de ingeniería, la gran mayoría de los objetivos expuestos en el primer capítulo se han podido llevar a cabo, tal y como ha sido explicado en los capítulos 4, 5 y 6.

En el capítulo 4, además de exponer los instrumentos de control, hemos visto como se ha configurado la red en los dos niveles más altos de un sistema SCADA (control y supervisión), y las características básicas de los elementos físicos que intervienen.

En el capítulo 5 hemos visto el control que se ha realizado en la planta a partir de unos requerimientos funcionales que la instrumentación ofrece. Se ha explicado también el procedimiento mediante el que obtenemos la curva de funcionamiento de los actuadores que así lo requieran. En el anexo, se ha expuesto el código fuente del programa de control realizado y el procedimiento para calibrar los sensores ultrasónicos de nivel utilizado.

Por último, las tareas referentes a la creación de la aplicación de supervisión SCADA han sido tratadas en el capítulo 6, donde hemos visto como se han distribuido los objetivos marcados en cuatro ventanas, cada una de las cuales ha sido explicada detallando tres aspectos:

- La funcionalidad.
- Las características del interface.
- Las ventanas secundarias asociadas, en caso de existir.

En el anexo se ha adjuntado el código de la programación de las rutinas asociadas a la aplicación de supervisión, comentadas en el propio capítulo 6.

En resumen, se puede concluir que el nivel de cumplimiento de objetivos ha sido prácticamente total, pero por motivos de tiempo, no se han podido realizar alguna de las funcionalidades previstas del sistema SCADA. En particular, en la aplicación de supervisión se tenía pensado realizar gráficos históricos para la visualización del perfil de evolución temporal de variables de proceso.

A pesar de todo y una vez concluido el trabajo, el sistema SCADA ha sido implantado con éxito en la planta piloto del laboratorio del Departament de Telecomunicació i d'Enginyeria de Sistemes. A su vez, las mejoras en el control e instrumentación de la planta primitiva han sido

notables y todas las funciones principales del sistema están implementadas habiéndose verificado su correcto funcionamiento.

7.2. CONCLUSIONES

Como es habitual en un proyecto de implantación y puesta en marcha de un sistema SCADA a nivel formativo, ha habido problemas de toda clase que han hecho ralentizar el progreso del trabajo en relación a la planificación inicialmente prevista. Los más destacados han sido:

- Rotura de la tarjeta de comunicación PROFIBUS de los variadores de frecuencia Danfoss, que paralizó el proyecto durante un mes aproximadamente, puesto que no encontrábamos el foco del problema. Finalmente se llevaron los variadores a una casa de reparación que trabaja para este fabricante, donde se detectó una avería en las tarjetas de comunicación, que fueron sustituidas.
- Rotura o desconexión de ciertos cables primitivos que se han detectado durante la fase de revisión del cableado.
- Sustitución de las electroválvulas de embotellado, puesto que no cerraban correctamente y permitían la circulación de líquido aún estando lógicamente cerradas.

Gracias a estos problemas (y algunos otros de menor importancia), y a los conceptos adquiridos mediante la documentación consultada y a través del soporte del tutor de este proyecto, he llegado a conocer en profundidad gran parte de la instrumentación, de los controladores locales, de los procesos industriales (continuos y batch) y de comunicación industrial, que me han permitido descubrir la faceta real de la informática industrial o, cuando menos realizar, una buena aproximación a ésta.

7.3. TRABAJO FUTURO

Una vez implementado el sistema SCADA se pueden proponer trabajos futuros a realizar a partir de este proyecto. Un ejemplo sería la exportación de la aplicación SCADA a un servidor Web, mediante el cual se pudiera visualizar el comportamiento de la planta en tiempo real, así como modificar algunos parámetros de producción existentes o obtener resultados productivos (i.e. número de botellas fabricadas), desde cualquier lugar con acceso a internet o, si interesa, intranet. Wonderware ofrece una aplicación para la implementación de este sistema de supervisión llamada Suite Voyager, mediante la cual, un futuro proyectista podría ampliar los horizontes de la planta piloto.

Otro trabajo podría ser la ampliación de la aplicación de supervisión con la adición de una ventana de históricos, en la que se pudiera ver la evolución de las variables de proceso. A partir de aquí, se podría extraer, entre otras cosas, una mejora en el método de sintonía del controlador PID asociado a las variables de proceso controladas por los lazos de control.

Otro ejemplo de tarea a realizar en la planta, ésta a nivel de campo, sería substituir algunas de las electroválvulas que unen la etapa de embotellado con la de mezcla, cuyo comportamiento no era del todo correcto.

BIBLIOGRAFÍA

- Danfoss. *Drives and controls: FCM 300 - VLT2800 Profibus*. Manual.
- Force, OPC Task. *OPC Overview*. Industry Standard Specification, 1998.
- Pere Ponsa Asensio y Ramon Vilanova Arbós. *Automatización de procesos mediante la guía GEMMA, cap 1-pag. 12*. Edicions UPC, 2004.
- SIEMENS. *SIMATIC NET, Instalation instructions CP5611*. Manual, 2001.
- Jaume Romagosa Cabús, David Gallego Navarrete y Raúl Pacheco Porras. *Sistemas SCADA*. Proyecto, Vilanova i la Geltrú: UPC, 2004.
- SAMSON. *Automation System TROVIS 6400: Industrial Controller TROVIS 6496*. Mounting and Operating Instructions, 2004.
- TECMES. "Sistemas SCADA." Folleto.
- Rivas, Lisbeth Carolina Pérez. "Técnicas Emergentes para la Automatización." Proyecto, Mérida, 2006.
- Diego Lemos, Juan, David Miranda Guerrero, and Alexander Arias. "OPC Como Alternativa a las Tecnologías Propietarias de Comunicación Industrial." Artículo, 2006.
- Sevilla, Universidad de. "CONTROL DE PROCESOS CON CONTROLADORES PID INDUSTRIALES." Prácticas.
- UAH. *Control Distribuido*. Apuntes, www.depeca.uah.es, 2006-07.
- www.automatas.org. 2006. <http://www.automatas.org/redes/profibus.htm>.
- LOGITEK. www.logiteksa.com/wonderware/intouch.htm.
- OPTI, Fundación. <http://www.opti.org>. Febrero 2008.
- Rosado, Alfredo. <http://www.uv.es/rosado>. 2006-07.
- SIEMENS. www.automation.siemens.com.

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: MODELO DE AUTOMATIZACIÓN PIRAMIDAL -----	12
FIGURA 2: MODELO HETERÁRQUICO PROSA -----	15
FIGURA 3: FOTOGRAFÍA DE UN PLC COMPACTO DE LA MARCA OMRON -----	18
FIGURA 4: ESQUEMA FUNCIONAL DE UN REGULADOR PID INDUSTRIAL. EXISTEN MUCHAS NOTACIONES DE LOS ELEMENTOS QUE CONFORMAN EL LAZO, COMO POR EJEMPLO MAGNITUD PILOTO = CONSIGNA -----	19
FIGURA 5: EJEMPLO DE TOPOLOGÍA DE RED PROFIBUS. SE OBSERVA UNA ESTACIÓN ACTIVA (MAESTRO) CORRESPONDIENTE A UN CONTROLADOR BASADO EN PLC, Y CUATRO ESTACIONES PASIVAS (ESCLAVOS) CORRESPONDIENTES A CUATRO DISPOSITIVOS DE E/S INTELIGENTES -----	23
FIGURA 6: MODELO DE REFERENCIA OSI. DE LAS 7 CAPAS, PROFIBUS UTILIZA LA 1, LA 2 Y LA 7 -----	23
FIGURA 7: CONECTOR SUB-D CON ASIGNACIÓN DE POLOS CORRESPONDIENTE AL ESTÁNDAR RS-485 -----	24
FIGURA 8: EJEMPLO DE DOS TIPOS DE TOPOLOGÍA DE RED PROFIBUS -----	25
FIGURA 9: VARIANTES DE PROFIBUS PARA DISTINTOS NIVELES DE TRABAJO-----	26
FIGURA 10: RESUMEN DE LAS PRESTACIONES BÁSICAS DE LOS TRES PERFILES PROFIBUS -----	26
FIGURA 11: ESQUEMA GENERAL DE LA PLANTA. LAS PARTES CENTRALES DE CADA ETAPA ESTÁN SEÑALADAS MEDIANTE RECTÁNGULOS DISCONTINUOS. -----	29
FIGURA 12: ESTRUCTURA DEL SISTEMA SCADA -----	33
FIGURA 13: PANEL FRONTAL DEL TROVIS 6496 -----	38
FIGURA 14: EJEMPLO DE EJECUCIÓN POR BLOQUES. OB: BLOQUE DE ORGANIZACIÓN; FC: FUNCIONES; DB: BLOQUE DE DATOS.-----	39
FIGURA 15: TRANSFERENCIA DE DATOS ENTRE LOS MAESTROS Y ESCLAVOS PROFIBUS -----	42
FIGURA 16: TIPOS DE PPO. NOTACIÓN DEL FABRICANTE DANFOSS -----	42
FIGURA 17: SE MUESTRA LA VENTANA: STATION MANAGER → EQUIPO SIMATIC 300 -----	44
FIGURA 18: VENTANA CORRESPONDIENTE A LA APLICACIÓN HW CONFIG -----	44
FIGURA 19: CATÁLOGO HARDWARE-----	45
FIGURA 20: EL CUADRO DE DIÁLOGO DE LA IZQUIERDA APARECE HACIENDO DOBLE CLIC EN EL HILO DE LA RED, Y SE PODRÁ CONFIGURAR EL IDENTIFICADOR ÚNICO DEL MAESTRO DP. CLICANDO ENCIMA DE LA PESTAÑA PROPIEDADES APARECE EL SEGUNDO CUADRO (PESTAÑA AJUSTE DE RED), EN EL CUAL SE PODRÁ CONFIGURAR LA VELOCIDAD DE LA RED Y EL PERFIL DP. -----	45
FIGURA 21: CONFIGURACIÓN PPO TYPE3 -----	46
FIGURA 22: ESQUEMA DE CONEXIÓN DE LOS VLT2800 A LA RED PROFIBUS. -----	48
FIGURA 23: CONECTOR SIEMENS CON REFERENCIA 6ES7 972-0BB50-0XA0 -----	49
FIGURA 24: TARJETA PCI CP5611 DE SIEMENS -----	50
FIGURA 25: ESQUEMA DEL FUNCIONAMIENTO DE LA COMUNICACIÓN OPC, MEDIANTE LA CUAL SE UNE EL SOFTWARE SIMATIC NET DE SIEMENS E INTOUCH DE WONDERWARE -----	53
FIGURA 26: AGREGACIÓN DE UN PC DENTRO DE UN PROYECTO DE STEP7 -----	54
FIGURA 27: YA SE HA INSERTADO EL PC EN EL PROYECTO. HAY QUE RENOMBRARLO. -----	54
FIGURA 28: VENTANA DE CONFIGURACIÓN DEL PC -----	55
FIGURA 29: APLICACIÓN NetPro -----	56
FIGURA 30: VENTANAS DE CONFIGURACIÓN DE UN ENLACE-----	57
FIGURA 31: VENTANA AJUSTAR INTERFACE PG/PC-----	57
FIGURA 32: EDITOR DE STATION CONFIGURATOR -----	58
FIGURA 33: VENTANA PARA INDICAR LA RUTA DEL PROYECTO. CARPETA XDBs-----	59
FIGURA 34: EDITOR STATION CONFIGURATOR CON LOS COMPONENTES COLOCADOS CORRECTAMENTE -----	59
FIGURA 35: APLICACIÓN OPC Scout DE SIEMENS SIMATIC NET -----	60
FIGURA 36: VENTANA OPC-NAVIGATOR -----	60
FIGURA 37: EJEMPLO DE COMUNICACIÓN CORRECTA ENTRE PC-PLC -----	61
FIGURA 38: PANTALLA PRINCIPAL DE LA APLICACIÓN OPCLINK-----	62

FIGURA 39: VENTANA DE CONFIGURACIÓN DEL TOPIC -----	63
FIGURA 40: VENTANA SERVER SETTINGS -----	63
FIGURA 41: MENÚ NAVEGABLE DE INTOUCH WINDOW MAKER-----	64
FIGURA 42: APLICACIÓN OPC TAG CREATOR -----	65
FIGURA 43: ESKEMA GENERAL DE LA ETAPA DE EMBOTELLADO-----	67
FIGURA 44: COMPOSICIÓN DEL TIEMPO DEL CICLO DE EMBOTELLADO (TCE). TL: TIEMPO DE LLENADO DE LA BOTELLA; TE: TIEMPO DE ESTABILIZACIÓN DEL LÍQUIDO; TG: TIEMPO DE GIRO DE LA NORIA. -----	68
FIGURA 45: CONCEPTO DE LA CAÍDA DE PRESIÓN QUE SE PRODUCE EN LA VÁLVULA ABIERTA-----	69
FIGURA 46: GRÁFICO ASOCIADO A LA TABLA ANTERIOR DE LA BOMBA 1. SE MUESTRA EL COMPORTAMIENTO DE LA BOMBA A DISTINTAS FRECUENCIAS DE FUNCIONAMIENTO -----	72
FIGURA 47: ESKEMA DE CONTROL DE LA ETAPA DE EMBOTELLADO. SEÑALES DE CONTROL. -----	74
FIGURA 48: IZQUIERDA: ESKEMA GENERAL DE LA NORIA; DERECHA: ESKEMA ELÉCTRICO DE LA NORIA -----	75
FIGURA 49: ESKEMA DEL EXPERIMENTO PARA DETERMINAR EL KV DE LAS ELECTROVÁLVULAS. SE PROCURA MANTENER EL NIVEL CONSTANTE A UN METRO DE ALTURA -----	76
FIGURA 50: GRAFICA DE LA CURVA DE FUNCIONAMIENTO DE LA ELECTROVÁLVULA 1 EN FUNCIÓN DE LA ALTURA DEL TANQUE. -----	78
FIGURA 51: EJECUCIÓN DE UN CICLO DE EMBOTELLADO CORRESPONDIENTE A LA LÍNEA 1 DE LA PLANTA -----	79
FIGURA 52: ESKEMA GENERAL DE LA ETAPA DE MEZCLA. ESTÁN CONTEMPLADOS TAMBIÉN LOS LAZOS DE CONTROL QUE SE IMPLEMENTARÁN. -----	80
FIGURA 53: ESKEMA DE CONTROL DE LA ETAPA DE MEZCLA. SEÑALES DE CONTROL.-----	83
FIGURA 54: ESKEMA DE LA EJECUCIÓN DEL CONTROL DE NIVEL -----	87
FIGURA 55: ESKEMA DE LA EJECUCIÓN DEL CONTROL DE NIVEL -----	87
FIGURA 56: ESKEMA DE LA EJECUCIÓN DEL CONTROL POR RATIO DEL PLC -----	88
FIGURA 57: GRÁFICAS DEL COMPORTAMIENTO DE LAS BOMBAS 3, 4, 5 Y 6. -----	89
FIGURA 58: ESKEMA GENERAL DE LA ETAPA DE EVAPORACIÓN -----	90
FIGURA 59: ESKEMA DE CONTROL DE LA ETAPA DE EVAPORACIÓN. SEÑALES DE CONTROL-----	93
FIGURA 60: ESKEMA DE LA EJECUCIÓN DEL PROGRAMA DE EVAPORADO-----	94
FIGURA 61: VENTANA GENERAL -----	97
FIGURA 62: VENTANA SECUNDARIA PID1 -----	100
FIGURA 63: VENTANA DE PRODUCCIÓN -----	101
FIGURA 64: VENTANA SECUNDARIA FALLO RELLENAR -----	104
FIGURA 65: VENTANA DE ALARMAS -----	105
FIGURA 66: VENTANA SECUNDARIA JERARQUÍA -----	107
FIGURA 67: VENTANA CONSIGNAS -----	108

INDICE DE TABLAS

TABLA 1: COMPARATIVA DE LOS DOS MODELOS DE AUTOMATIZACIÓN INTEGRADA -----	10
TABLA 2: CÓDIGO DE CONTROL VLT2800 -----	43
TABLA 3: PARÁMETROS PROFIBUS A CONFIGURAR EN EL VLT2800 -----	47
TABLA 4: DISTRIBUCIÓN DE LOS PINES EN CABLE DE COMUNICACIÓN PC-PLC -----	50
TABLA 5: TABLA DE MEDIDAS TOMADAS EN LA BOMBA 1 PARA DETERMINAR LA CURVA CARACTERÍSTICA DE ÉSTA. -----	72
TABLA 6: TABLA DE LAS LECTURAS DE CAUDAL REALIZADAS EN LA ELECTROVÁLVULA DE LA LÍNEA 1. PARA LA SEGUNDA LÍNEA EL PROCEDIMIENTO SERÁ ANÁLOGO. -----	77
TABLA 7: RESULTADO DE LOS CINCO EXPERIMENTOS PARA DETERMINAR EL KV DE LA ELECTROVÁLVULA 1.-----	77
TABLA 8: VALORES DE CONFIGURACIÓN DEL TROVIS PARA EL CONTROL DE CAUDAL-----	86

RESUM

Aquest projecte consisteix en la implantació d'un sistema SCADA a una planta pilot de fabricació y embotellat de líquids. En aquest document es mostra tota la informació que ha estat necessària per realitzar el sistema d'automatització en els tres nivells propis d'un SCADA: nivell de camp, nivell de control, y nivell de supervisió.

El treball de camp ha estat, típicament, de revisió, donat que el Departament de Telecomunicació i d'Enginyeria de Sistemes ja posseïa la planta totalment equipada, mentre que el sistema de control i el sistema de supervisió s'han implantat totalment.

RESUMEN

Este proyecto consiste en la implantación de un sistema SCADA en una planta piloto de fabricación y envasado de líquidos. En este documento se muestra toda la información que ha sido necesaria para realizar el sistema de automatización en los tres niveles propios de un SCADA: nivel de campo, nivel de control y nivel de supervisión.

El trabajo de campo ha sido, típicamente, de revisión, puesto que el Departament de Telecomunicació i d'Enginyeria de Sistemes ya poseía la planta totalmente equipada, mientras que el sistema de control y el sistema de supervisión se han implantado totalmente.

ABSTRACT

This project involves the implantation of a SCADA system in a pilot plant for fabrication and bottling of liquids. This document shows all the information it has been necessary to perform the automation system at all three levels encountered by a SCADA system: process level, control level and supervisory level.

The work done in the process level has been, typically, for revision, because the *Departament de Telecomunicació i d'Enginyeria de Sistemes* had already owned the plant fully equipped, while the control system and monitoring system has been implemented fully.