

# Estudio de un sistema SCADA de embotellado bajo un entorno *Profibus*

Trabajo teórico

Jaime Casas Rustarazo  
Aarón Cuevas López

Master en ingeniería de sistemas electrónicos  
< jaicarus@upv.es >  
< aacuelo@teleco.upv.es >

**Abstract:** El presente documento muestra la elección y configuración de la topología de bus para el control de una planta automatizada en un sistema SCADA. Se parte como base de una planta de embotellado compuesta por dos células independientes pero a su vez interrelacionadas entre sí, una célula mezcladora que obtiene un producto mezcla de dos productos base, y una celda embotelladora del mismo. Tras analizar los requerimientos del sistema y disponiendo de un amplio rango de buses industriales disponibles, se plantea el enfoque del problema desde la perspectiva de una red *Profibus* a todos sus niveles jerárquicos.

**Keywords:** Buses de campo • Profibus • Automatización industrial • Planta de embotellado

# Tabla de Contenidos

<b>1. Introducción</b>	1
<b>2. Caso bajo estudio</b>	1
2.1. Descripción de la planta	1
2.1.1. Zona de mezclado	2
2.1.2. Zona de llenado	3
2.2. Elementos a considerar	4
<b>3. Solución propuesta</b>	5
3.1. Selección del bus	5
3.2. Profibus	5
3.2.1. Profibus PD	7
3.2.2. Profibus PA	9
3.2.3. Profibus FMS	10
3.2.4. Profinet	10
3.3. Aplicacion al caso bajo estudio	11
<b>4. Presupuesto</b>	14
<b>5. Conclusiones</b>	16
5.1. Idoneidad del diseño	16
5.2. Alternativas	16
5.2.1. Modbus	16
5.2.2. Otras alternativas	17

## 1. Introducción

Desde la aparición de los primeros sistemas industriales la creciente complejidad de los mismos ha propiciado la necesidad de la automatización de los procesos. Esta automatización precisa de un sistema de control, originalmente realizado mediante relés y lógica cableada, dónde los protagonistas actuales son los PLCs y hasta los ordenadores personales gracias al avance de los sistemas programables.

Pese a las posibilidades de los sistemas digitales, el problema de la escalabilidad de los equipos dió lugar a la aparición de los primeros buses de campo, los cuales permiten la interconexión de multitud de elementos como sensores o actuadores mediante una variedad de topologías utilizando una transmisión digital de la información, mucho más robusta al ruido que las tradicionales señales analógicas, lo cual los hace ideales para los entornos industriales.

Bajo esta clase de sistemas automatizados interconectados por buses digitales aparecen los sistemas SCADA, acrónimo de *Supervisory Control And Data Acquisition* (Supervisión, Control y Adquisición de Datos). Estos sistemas constan de la red de elementos junto a un software que permite a un supervisor humano revisar en tiempo real el estado del sistema y ajustar los parámetros conforme sea necesario, permitiendo evaluar el estado del sistema y facilitar la gestión de la producción.

En el presente documento se va a mostrar un ejemplo de un sistema automatizado para una planta de envasado e líquidos con la posibilidad de supervisión mediante un sistema SCADA. El objetivo es estudiar las necesidades de un proceso industrial concreto y escoger las tecnologías de comunicación que serán necesarias para su implementación.

## 2. Caso bajo estudio

El caso de ejemplo que se va a tratar consta de una versión simplificada del tramo final de una planta embotelladora en la que se va a implementar un sistema SCADA. Como se verá, este ejemplo provee la oportunidad de estudiar no sólo la implementación de un bus de campo sino una estructura jerárquica del mismo.

### 2.1. Descripción de la planta

En la figura 1 se puede observar el proceso a tratar, el cual se ha dividido en dos fases. Éste comienza con el mezclado de dos materias primas en un único depósito dedicado a tal efecto. Una vez obtenida la mezcla esta se almacena en un segundo depósito. Esto se hace así para asegurarse de que dicho depósito contiene el producto correctamente mezclado, controlando el llenado de manera periódica. Este es pues un proceso secuencial en el que primero se juntan los componentes, se mezclan y se traspasa el resultado al depósito de almacenamiento.

La segunda parte, por su parte, es el llenado y sellado de los recipientes. El llenado se realiza por gravedad, de modo que un depósito estrecho y alto se mantiene al nivel adecuado de producto desde el depósito de almacenamiento antes mencionado. Cuando una botella se encuentra lista, simplemente se abre una válvula que permitirá al líquido salir. Los recipientes viajan, a su vez, en un sistema transportador que va deteniéndose bajo la válvula de llenado. Estas pausas son aprovechadas por un segundo sistema, compuesto de un pistón neumático, que realiza el sellado de los recipientes que, finalmente, pasan a un siguiente proceso para el empaquetado.

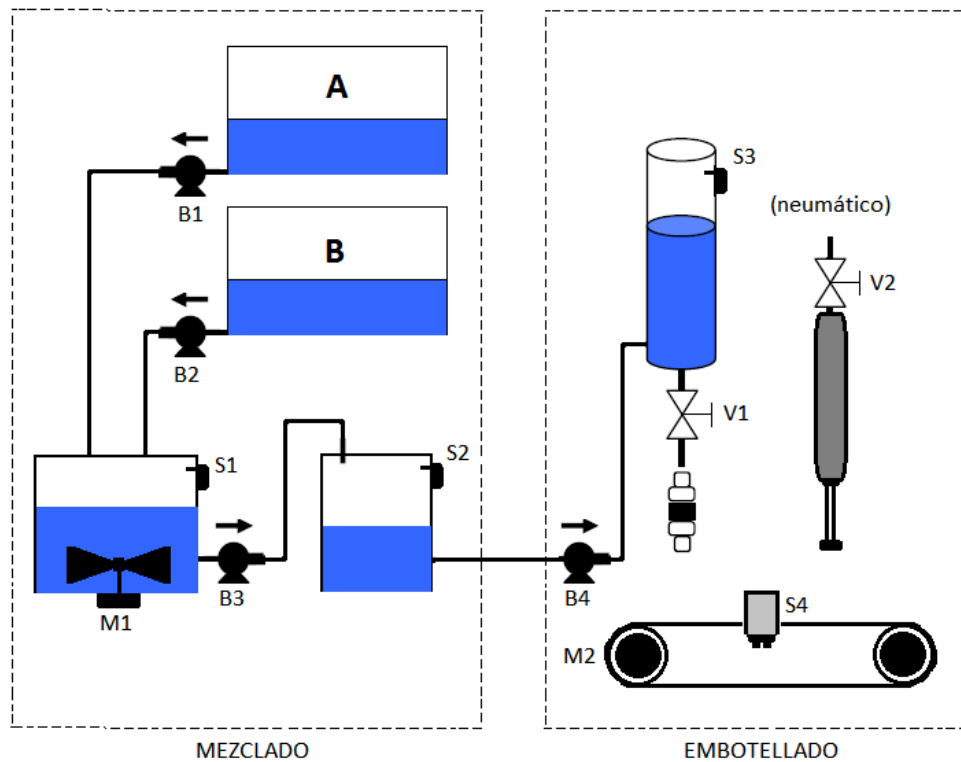


Figure 1: Esquema general del proceso a estudiar

Estas dos zonas se han implementado, como se verá, como dos subprocesos independientes, cada uno controlado por un PLC distinto y coordinados por un sistema de jerarquía superior.

### 2.1.1. Zona de mezclado

El proceso realizado en esta zona se trata de la siguiente secuencia de eventos:

1. Vertido de ambas materias primas en la proporción necesaria en el mezclador.
2. Mezcla de las sustancias.
3. Traslado del producto final al depósito de almacenamiento temporal.

Los elementos necesarios para este proceso son por tanto:

- 3 Bombas
- 1 Motor (para el mezclador)
- 3 Sensores de nivel

Las bombas con sus correspondientes sensores de flujo o velocidad.

El sistema comienza pues el proceso de mezclado cuando recibe una señal indicando que el depósito intermedio está por debajo de cierto nivel, enviada por el controlador de jerarquía superior. Puesto que se conocen los flujos que deben recorrer cada elemento, controlados mediante lazo cerrado, y el tiempo de mezclado, el resultado de este subproceso es pues una cantidad fija de producto que se añadirá al depósito intermedio cada vez que se active, por lo que cada vez que finalice generará una señal para informar de ello.

### 2.1.2. Zona de llenado

En esta zona se realiza el llenado y sellado de los recipientes. Para ello, por un lado, el sistema se asegura que el depósito de llenado esté siempre por encima de un cierto nivel para garantizar la presión necesaria y por otro va transportando los recipientes que serán llenados y sellados. Los elementos necesarios en este caso son:

- 1 Bomba
- 1 Válvula para el llenado
- 1 Válvula para el sistema neumático del taponador
- 1 Motores para la cinta transportadora
- 1 Sensor de nivel, para el depósito de la llenadora
- 1 Sensor *anti-jamming* para la cita

El sistema pues constará de una cadena de recipientes que se irán colocando uno a uno bajo el sistema de llenado, el cual abrirá la válvula un tiempo definido tras el cual la cadena de botellas avanzará otro paso. Simultáneamente recipientes ya llenos se irán sellando mediante un pistón igualmente alineado.

Conocidos y controlados el flujo y tiempo de apertura de la válvula de llenado y de la bomba procedente del depósito intermedio se puede derivar el nivel en el depósito de llenado, que será mantenido mediante la activación de dicha bomba. El nivel del depósito intermedio se puede inferir mediante el flujo de salida de la bomba y la información de llenado por lotes recibida desde el subsistema de mezclado.

## 2.2. Elementos a considerar

Además de los sensores y actuadores descritos, se propone que el diseño tenga que cumplir las siguientes características:

- Ha de implementar *fail-safes* para evitar problemas en la cadena en caso de errores o fallos de algún dispositivo. Esto supone la introducción de sensores en los depósitos que informen de casos excepcionales de desbordamiento o de vaciado no esperados y de un detector de atasco en la cadena de recipientes.
- Ha de ser modular, permitiendo tanto la conexión de varias fases de llenado partiendo de una única fase de mezclado como la conexión de varias cadenas de mezclado-llenado para distintos productos.
- Ha de ser escalable, de modo que sea posible ampliar el sistema en un futuro o implementar la cadena en sistemas de producción ya operativos.
- Ha de permitir supervisión tanto a nivel de línea como a nivel global de planta.

Con respecto a otros parámetros se puede decir que:

**Distancia:** La distancia entre elementos de un mismo subsistema será de unos metros mientras que entre una zona de llenado y una de mezclado puede haber varias decenas de metros. La distancia entre distintas cadenas puede ser, sin embargo, mayor.

**Ancho de banda:** El requisito de ancho de banda, si este está bien aprovechado, no es especialmente grande ya que cada subsistema maneja unos pocos elementos.

**Jerarquía:** Es conveniente que el sistema de control pueda ser jerárquico, al permitir esto reducir los requisitos de ancho de banda y facilitar la modularidad.

**Latencia:** La latencia del sistema no es crítica, siempre que sea conocida para poderla tener en cuenta en el cálculo de los flujos por temporización.

**Comunicación por eventos:** Aunque no es estrictamente necesaria, la posibilidad de informar de algunos eventos (como la finalización del proceso de mezclado o una excepción por parte de los elementos de seguridad) en lugar de una interrogación constante permite aliviar las necesidades de ancho de banda y facilita la implementación.

## 3. Solución propuesta

### 3.1. Selección del bus

Para llevar a cabo el desarrollo del sistema propuesto se ha optado por una implementación basada en Profibus. A continuación se explicará de forma introductoria el funcionamiento de este tipo de bus y las posibilidades que ofrece para posteriormente abordar el problema de la planta en cuestión. Finalmente, se ofrecerán algunas alternativas y se expondrán los motivos por los cuales se ha decidido utilizar Profibus en detrimento de otros buses de campo existentes.

### 3.2. Profibus

Los inicios de Profibus datan del año 1987. Fué originado en Alemania gracias al trabajo cooperativo entre las firmas Bosch, Klöckner Möeller y Siemens con el objetivo de desarrollar un proyecto de arquitectura de comunicaciones industriales. Dicho proyecto giraba en torno a facilitar la interconexión entre dispositivos de diferentes fabricantes. Dicha línea de trabajo era bastante atractiva desde el punto de vista de las empresas del sector debido su amplio potencial por lo que otras grandes compañías como ABB, AEG o Landis&Gir se vieron interesadas en el proyecto, integrándose en el mismo. Siguieron el mismo camino algunas universidades y organizaciones técnicas estatales, como el Ministerio Federal de Investigación Alemán.

Se formaron varios grupos de trabajo centrados en diversas áreas, la finalidad conjunta de los cuales era concluir en un sistema de comunicaciones apto para integrar desde sencillos transductores y elementos de campo hasta autómatas y controles numéricos, pasando por ordenadores, herramientas de diagnóstico y sistemas informáticos de gestión de la producción. Dos años después de los inicios del proyecto, en 1989, la norma alemana DIN19245 adoptó el estándar Profibus-PA y Profibus-FSM. La norma Profibus-DP no sería definida hasta el año 1993. El comité del grupo de empresas que integraban el proyecto abrieron la posibilidad para cualquier usuario o empresa del sector de integrarse en un consorcio denominado *PROFIBUS Nutzerorganisation*, que sigue desarrollando dando soporte a nivel de aplicación así como en servicios de certificación de productos.

Profibus es actualmente uno de los buses de campo que goza de mayor aceptación en el mercado a nivel mundial. Sus áreas de aplicación incluyen la automatización, generación de procesos y manufacturación. Desde el año 1996 se encuentra confirmada como norma europea EN50170, lo cual asegura una protección óptima a vendedores y fabricantes, y por otra parte también permite la independencia de estos últimos permitiendo al usuario la compatibilidad ante diferentes dispositivos certificados bajo dicha norma.

#### *Arquitectura genérica de una planta basada Profibus*

A la hora de definir los elementos del bus debe diferenciarse entre los siguientes elementos.

- Activos: aquellos nodos capaces de asumir el control del bus, adoptando el papel de master.
- Pasivos: comprende a todo el grupo formado por aquellos dispositivos que únicamente pueden actuar como esclavos, careciendo de este modo de la capacidad de control que poseen los anteriores. Únicamente pueden entablar comunicación con un master (bajo petición y control de éste), siendo los esclavos incapaces de comunicarse por sí solos con otros esclavos.
- Repetidores: Transceptores bidireccionales, cuya finalidad es únicamente la de actuar de *buffers* regeneradores de niveles de señal en el medio físico.

En la figura (2) se muestra un esquema general de la topología de una instalación basada en Profibus.

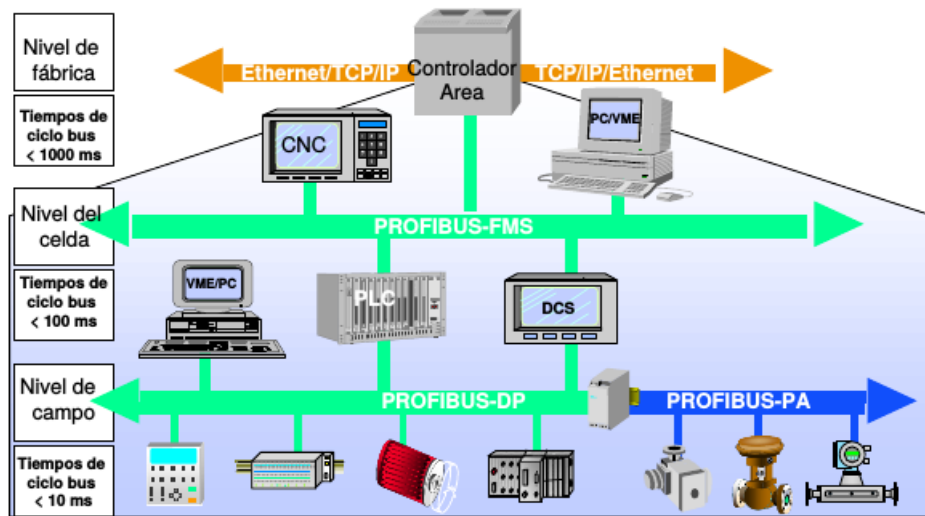


Figure 2: Esquema general de la topología de una instalación Profibus

En dicha imagen pueden observarse tres tramos claramente diferenciados bajo las siglas *PA*, y por otra parte *PD* y *FSM*. Cada una de estas implementaciones del bus presenta unas particularidades concretas y tiene una función que la diferencia de las otras. En la figura (3) se aprecia la situación de Profibus en el modelo de capas OSI (*Open System Interconnection*), modelo de referencia de acuerdo con la norma internacional SO7498.

Profibus interviene en las capas 1, 2 y 7. La capa 1 hace referencia a la conexión física sobre la cual se sustenta la transmisión. La capa 2 o capa de enlace de datos define el protocolo de acceso al bus, adjudicando el testigo de arranque para los masters en caso de pérdida del mismo o en caso de adición o sustracción de un máster del segmento de bus. Finalmente, la capa 7 define las funciones de aplicación.



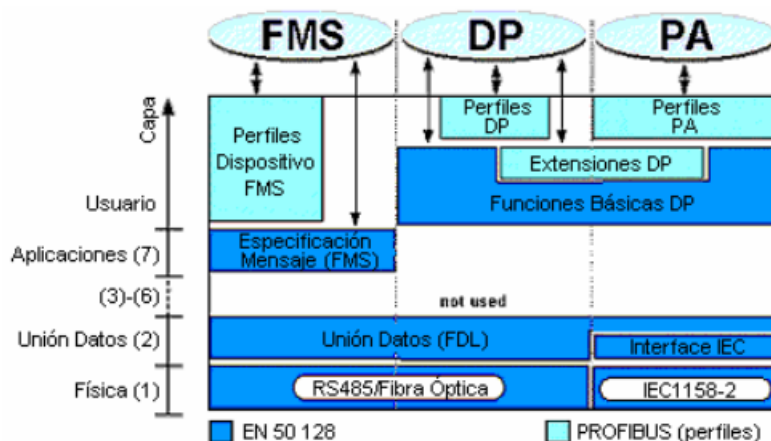


Figure 3: Situación de Profibus en el modelo de capas OSI

### 3.2.1. Profibus PD

Se trata de la transmisión más frecuentemente utilizada dentro de Profibus. Implementa las capas 1 y 2 del modelo OSI, mientras que deja las capas 3 a 7 sin definir. Se conoce bajo el nombre de *H2*. La transmisión se cablea bajo RS485, el motivo de ello es su simplicidad, velocidad de transmisión y reducidos gastos de instalación. Las velocidades alcanzables por RS485 dependerán de la longitud del cable, dicha restricción queda recogida en la tabla (4).

<b>MEDIO FISICO</b>	<b>VELOCIDAD ( Kbits/s )</b>				
	9.6-93.75	167.5	500	1500	2000
<b>RS 485 0.2<sup>2</sup></b> <b>(24 AWG)</b>	1200m	600m	200m	100m	50m
<b>RS 485 0.5<sup>2</sup></b> <b>(20 AWG)</b>	2400m	1200m	400m	200m	100m
<b>F.Opt.Cuarzo</b> <b>62.5-125μm</b>	1400m	1400m	1400m	1400m	1400m
<b>F.Opt.Plástico</b> <b>0-40°C</b> <b>0-50°C</b>	5-25m 10-20m	5-25m 10-20m	5-25m 10-20m	5-25m 10-20m	5-25m 10-20m

Figure 4: Velocidades disponibles mediante el uso de RS485

El modo diferencial propio del estándar RS485 lo dota de una alta inmunidad al ruido y la transmisión de datos se realiza mediante codificación NZR (*Non-Zero Return*), lo cual asegura un reducido nivel de continua en

la línea. La transmisión de datos se realiza mediante dos cables en par trenzado apantallado, imprescindible en los ruidosos ambientes industriales. Se trata de una conexión *half-duplex*. La velocidad de transmisión se mueve dentro del rango de los 9.6 KBit/seg a 12 Mbit/seg, dependiendo de la distancia del cable (hasta 1200 m). En (5) se recogen la velocidad alcanzable dependiendo de la longitud de la conexión bajo el segmento *Profibus DP*.

<b><i>V.Baudios(kbit/sec)</i></b>	<b>9.6</b>	<b>19.2</b>	<b>93.75</b>	<b>187.5</b>	<b>500</b>	<b>1500</b>	<b>2000</b>
<b><i>Dinstancia</i></b>	<b>1200m</b>	<b>1200m</b>	<b>1200m</b>	<b>1000m</b>	<b>400m</b>	<b>200m</b>	<b>100m</b>

Figure 5: Velocidades alcanzables mediante *Profibus DP*

Su ámbito de aplicación incluye todas las áreas en las que se requieren de alta velocidad de transmisión a nivel de dispositivo así como una instalación sencilla. La finalidad del mismo es servir de nexo entre el o los elemento activos (master/masters) y los sensores y actuadores de la planta. En un mismo segmento de bus pueden coexistir diferentes elementos activos, en este caso el arbitraje del bus se realiza mediante paso de testigo. Usualmente el papel de master recae sobre uno o varios PLC, a pesar de que pueden existir otros elementos que también asumen el papel de master, tales como PCs o herramientas de diagnóstico (el anclaje de estas últimas al bus será temporal).

Una ventaja importante es que se trata de un sistema escalable de forma que una vez instalada la planta, posibles ampliaciones de la misma no influyen en las estaciones que ya se encontraban en estado funcional. A pesar de que a nivel físico suele utilizarse RS485 el estándar también prevee el uso de fibra óptica en situaciones en las que las distancias a cubrir sean demasiado grandes o se trate de una instalación especialmente ruidosa. Las velocidades de operación son del orden de 1 ms. para transmitir un bloque de 512 bits de datos de entrada y 512 de salida en 32 estaciones, permitiendo una velocidad del orden de 12 Mbit/seg. El modo de comunicación entre el máster y los esclavos se realiza de forma cíclica mediante barrido de los mismos.

Permite el modo de notificación de eventos asíncrono de modo que hace posible el tratamiento de excepciones o eventos, facilitando de este modo el tratamiento de los errores de operación en la planta sin necesidad de *polling* (escaneo continuo de las condiciones de funcionamiento). Incorpora un sistema de localización rápida de errores, los mensajes de diagnóstico se transmiten por el bus y son recogidos en el maestro, dividiéndose posteriormente en tres niveles jerarquizados de menor a mayor especialización. Por una parte los relativos a estaciones (estado general del dispositivo), por otra parte relativos a módulos (errores en rangos específicos de entrada y salida) y finalmente relativos a canales (errores en bits individuales de bit).

En lo que a seguridad y protección se refiere, el estándar incorpora *watchdog* en los esclavos de forma que ante un error en la ejecución siempre es posible retornar al dispositivo a un estado operativo, función que deberá

implementar el programa que gobierna el control del PLC. Incorpora protección de acceso para las entradas y salidas de manera que en un segmento multimaster cada master podrá acceder únicamente a aquellos esclavos sobre los que posee permisos de acceso. Todos los mensajes son transmitidos con una distancia de seguridad de cuatro ciclos de reloj (*anti-jamming* a nivel de datos).

El estandar distingue entre tres tipos de elementos conectables al bus,

- DP maestro clase 1 (DPM1): Bajo esta categoría se engloban todos aquellos dispositivos programables centrales, tales como PLCs o PCs. Son los masters que implementan la funcionalidad del módulo de la planta el cual controlan, y permiten la operación sobre los distintos actuadores y sensores de forma acorde al programa el cual ejecutan.
- DP maestro clase 2 (DPM2): Elementos de tipo master de diagnóstico, programación o configuración de la planta. Se trata de elementos que se conectan al bus, generalmente de forma temporal, para llevar a cabo tareas de mantenimiento.
- DP esclavo: Comprenden el conjunto formado por los sensores y actuadores esclavos de la planta, bajo el control del o los master o masters.

Por otra parte el número de elementos conectables al bus está limitado a 32 dispositivos, para superar dicha limitación será necesario utilizar repetidores (cuentan como un elemento en el bus). Haciendo uso de repetidores es posible aumentar el número de elementos a 127.

### 3.2.2. Profibus PA

*Profibus PA* supone una concreción de la implementación *Profibus DP*. Incorpora la alimentación en las mismas líneas de datos, de forma que solo se necesita una línea de dos cables para transmitir toda la información y energía a los dispositivos de campo. Para ello se basa en la tecnología IEC 1158-2, permitiendo la conexión y desconexión de dispositivos en caliente sin repercusión sobre el resto de elemento del segmento, también en áreas de seguridad intrínseca con peligros potenciales de explosión. Para la comunicación se utiliza codificación Manchester. Presenta velocidades de operación inferiores a *Profibus DP*, siendo posible la unión de esclavos del primero al segundo, sin embargo esto supone una penalización en lo que a velocidad se refiere. Es posible la unión entre un bus *Profibus DP* y *Profibus PA* a través de un *bridge* específico, el cual actúa de adaptador de velocidad entre ambos, siendo visto como un esclavo desde el segmento *Profibus DP* y como un master desde el segmento *Profibus DP* para el cual actúa de puente.

### 3.2.3. Profibus FMS

*Profibus FMS* supone un nivel de bus superior en la jerarquía. De forma análoga a las funciones de *Profibus DP/PA*, los cuales permiten la conexión de los elementos master y esclavo, el nivel *Profibus FMS* tiene como función la conexión de los diferentes master a nivel de célula. En contraposición con el nivel inferior en el que prima la velocidad de la comunicación, en el nivel *Profibus FMS* es más importante un elevado grado de funcionalidad.

Tomando cada célula o elemento lógico como una unidad funcional independiente, el bus *Profibus FMS* hace posible el control de todas las células del dominio de operación desde un host (PC, máquina CNC u dispositivo de control). Permite cargar y leer áreas de memoria, crear, iniciar y detener programas en los PLC (que actúan de esclavo en las células inferiores).

Una vez instaladas y cableadas las diferentes unidades funcionales de la planta, cada una bajo el dominio de un bus *Profibus DP/PA* y bajo el control del respectivo (o respectivos) PLC bajo el papel de master, mediante *Profibus FMS* se posibilita la visión global de la planta como unificación en una sola unidad operativa permitiendo el control completo de la misma bajo la visión de un proceso común. Para ello y desde el punto de vista del host que lleva a cabo el control, cada unidad funcional se ve bajo el concepto de "dispositivo virtual de campo".

### 3.2.4. Profinet

Profinet puede definirse como una implementación del protocolo Profibus tomando como base Ethernet industrial. El principal problema que presenta Ethernet es que el protocolo de acceso al medio CSMA/CD no es un protocolo determinista y únicamente puede ser estudiado mediante modelos estadísticos, ello supone una gran limitación en entornos de tiempo real en los que los tiempos de operación deben ser estrictamente acotados. El uso de conexiones punto a punto entre nodos y el uso de *switches* soluciona este problema, sin embargo introduce otro diferente ya que al tratarse de sistema basado en paquetes en el que el *switch* actúa de *buffer* temporal, no es posible predecir el tiempo que los paquetes quedarán retenidos en él. Esto dependerá del tráfico y nivel de congestión en la red, lo cual nuevamente supone un grave problema en lo que aplicaciones de tiempo real se refiere.

Para tratar los problemas de la falta de determinismo, para el desarrollo de *Profinet* se ha hecho una optimización de la transmisión a nivel de capa de enlace de datos introduciendo la posibilidad de especificar la prioridad de los paquetes. De esta forma se hace posible la convivencia de estos paquetes de datos con las tramas TCP/IP, permitiendo de este modo usar la misma conexión.

De la misma forma que *Profibus FMS* avanzaba un nivel por encima de la topología en un sistema basado en segmentos de bus *Profibus DP/PA*, mediante *Profinet* es posible subir un nivel por encima de un dominio *Profibus FMS* (visto bajo el concepto de área) y permitir de este modo la interconexión de diversas áreas de producción

dentro de una planta industrial sobre el protocolo Ethernet subyacente.

### 3.3. Aplicacion al caso bajo estudio

A la hora de establecer la topología de red de sensores y actuadores es posible abordar el problema de diferentes formas. La configuración de componentes se ha dedicado tal y como se muestra en la figura (6).

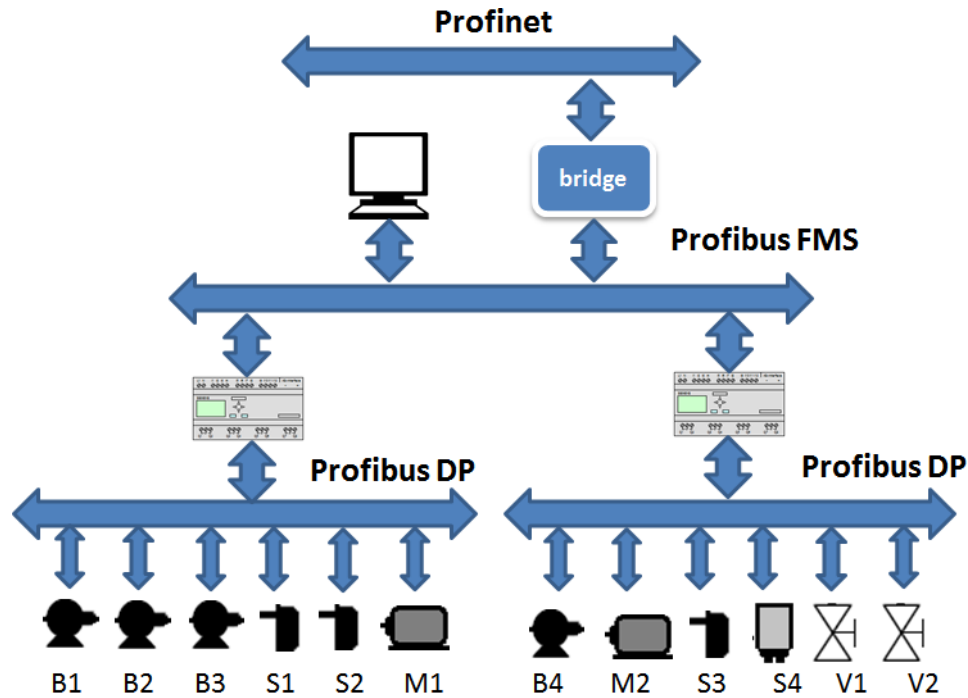


Figure 6: Configuración del bus de la planta

El motivo de separar la celda de mezclado de la de llenado en un segmento de bus independiente es que a pesar de que ambas celdas trabajan de forma conjunta, son funcionalmente independientes. En una configuración básica la zona de mezclado proveerá de producto a la llenadora, sin embargo podría ser que una misma mezcladora suministre el líquido a diferentes celdas de llenado que, por otra parte, pueden estar bastante distantes dentro de la nave. La imagen mostrada presenta una forma eficaz de establecer la configuración del bus, en aras de obtener una topología modular y escalable.

Todos los sensores y actuadores de la celda de mezclado están unidos a un segmento *Profibus DP*, cableado bajo par trenzado RS485. El control del mismo recae sobre el PLC de control, único elemento activo del segmento. El PLC es el encargado de llevar a cabo la coordinación de los 6 esclavos bajo su dominio con el fin de obtener

el producto mezclado, para ello ejecuta un programa *batch* o programa secuencial, en el que se ejecutan las instrucciones del programa (*receipes*) una tras otra.

1. Accionamiento de las bombas B1 y B2 hasta alcanzar la proporción adecuada de los dos elemntos a mezclar en la cubeta mezcladora. Para ello se controlará el flujo de las bombas a través de las ecuaciones que modelizan el llenado del depósito. Conociendo el área de la base, la altura y la proporción se actuará sobre ambas bombas en la medida justa.
2. Una vez obtenida la proporción de ambos elementos adecuada y las bombas se encuentran ya desconectadas, se procederá a la mezcla de los dos líquidos. Para ello el PLC deberá accionar M1, el motor que remueve la mezcla, y mantener este estado de funcionamiento durante un tiempo predeterminado.
3. Una vez ha transcurrido el tiempo suficiente como para haber obtenido ya una mezcla homogénea se detiene el motor de mezclado y se acciona la bomba B3, que transportará el producto mezclado hacia un depósito intermedio que sirve de almacén temporal hacia la máquina de llenado de botellas.
4. En caso de que el flujo de líquido desde los depósitos centrales descienda por debajo de un nivel prefijado (sensado a través del caudalímetro incluido en la propia bomba) deberá notificarse a través del nivel FMS al host de control superior mediante una notificación que avise a los operarios de la necesidad de sustituir los tanques de materia prima.

Los sensores S1 y S2 tienen como función el control de desbordamiento de los depósitos de mezclado y de almacén. Durante el régimen de funcionamiento normal estos sensores no deberían activarse nunca ya que el control se realiza en bucle cerrado mediante modelización del sistema a partir de ecuaciones sencillas, al tratarse de caudal de flujo entre depósitos, con áreas y alturas fijas y caudales controlables. Sin embargo no está de mas proveer al sistema de los medios necesarios para abortar el funcionamiento en caso de que, por ejemplo, el mecanismo de apertura de una válvula sufriera una avería y se desbordara el nivel de líquido de un depósito, encharcando la zona circundante y entrando en contacto con la instalación eléctrica, evitando de este modo la posibilidad de un accidente mayor. La activación de los sensores de desbordamiento es una excepción del sistema, y los sensores notificarán al PLC (y a los host superiores de diagnóstico) cuando esto se produzca, abortando el programa. El PLC no necesita estar constantemente comprobando los *flags* de error mediante *polling*, lo cual supondría un malgasto de ancho de banda a tener en cuenta.

Por otra parte la celda de embotellado se ha agrupado en un segmento de bus independiente, también *Profibus DP*. En este caso no se trata de un procesamiento secuencial sino mas bien concurrente, en el cual el PLC sobre el cual se delega el control deberá asegurar el cumplimiento de las siguientes tareas,

- Mediante la bomba B4 se extrae el líquido del depósito intermedio hacia el llenador. El llenador es un dispositivo consistente en un pequeño depósito en la parte inferior del cual se haya una válvula accionada

por solenoide. Debe asegurarse que el nivel de líquido en el depósito del llenador se encuentre comprendido entre un mínimo y máximo el torno a un valor ideal, el cual asegura la presión de caída adecuada a través de la boquilla tras la apertura de la válvula hacia el interior de la botella. El PLC deberá asegurar que el depósito del llenador se encuentre al nivel adecuado, obteniendo el líquido para ello del depósito intermedio a través de la ya citada bomba B4.

- El motor M2 es el encargado del accionamiento de la cinta transportadora, sobre al cual se desplazan las botellas. El PLC deberá coordinar el movimiento de la cinta, de forma que cada botella pare justo debajo de la boquilla de llenado.
- La válvula V1 es la encargada de permitir la caída por efecto de la gravedad desde el depósito final de la llenadora hasta el interior de la botella.
- El PLC deberá también controlar el pistón neumático, encargado de poner el tapón a las botellas conforme se finaliza el llenado de las mismas.
- El sensor S4 es un sensor anti bloqueo basado en barreras IR, la finalidad del mismo es garantizar que no se producen atascos en la cinta transportadora y que la separación de las botellas es la correcta. Para permitir coordinar el motor de la cinta transportadora con el llenado y el taponado de las botellas es necesario preveir bloqueos y asegurar el correcto movimiento de las botellas, el sensor S4 ayuda a que esto sea posible y permite detener el sistema ante un posible atasco en la cinta.
- El sensor S3 trabaja de forma análoga a los sensores S1 y S2 vistos en la celda anterior, su función es servir de medida de seguridad para prevenir que el nivel de líquido pueda rebosar el máximo del depósito y posibilitar al PLC a notificar al nivel de la jerarquía superior, así como a detener el sistema.

El hecho de situar ambas celdas en un segmento de bus diferente posibilita, como ya se ha explicado anteriormente, la obtención de un sistema modular y escalable. Cada celda está controlada por un PLC dedicado, y ambos PLCs estarán unidos al mismo segmento de bus *Profibus FMS*. Unido a él se encuentra un ordenador, que mediante una tarjeta *PCIe* interna permite el control de todo el conjunto, permitiendo la descarga y control de los programas que se ejecutan bajo los PLCs, así como la monitorización y tareas de diagnóstico. Finalmente y por otra parte, se ha dotado al sistema de un *bridge* a Ethernet, de forma que permite integrar las celdas de producción de la planta descrita en un nivel todavía superior de la jerarquía a nivel de fábrica, en el cual se utiliza *Profinet* para el cableado del nivel superior de la empresa. En la imagen (7) se observa un ejemplo de escalabilidad a partir del sistema descrito, desde el punto de vista de la jerarquía superior *Profinet*. Puesto que la celda de mezclado y de envasado son independientes es posible interconectar diversas celdas de llenado a una misma de mezclado. Por otra parte, si diversas células de llenado o mezclado se encuentran cercanas en la nave es posible acoplarlas al mismo segmento FMS. Finalmente y en el *top-level* de la jerarquía se encuentran los sistemas informáticos de gestión y programación de toda la planta.

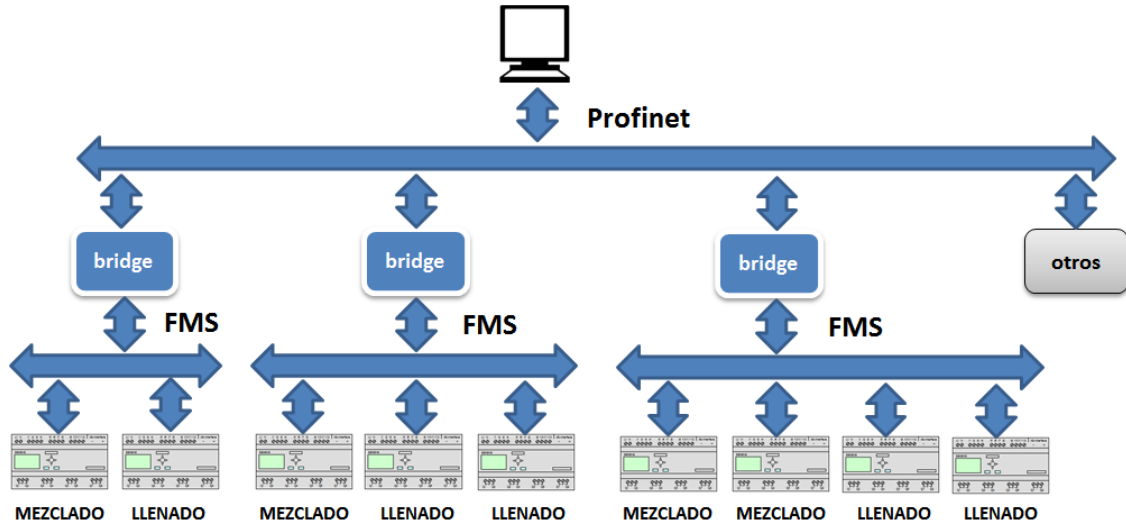


Figure 7: Escalabilidad del sistema a nivel de fábrica

El hecho de posibilitar la opción de suministro a varias celdas de llenado desde una de mezclado compartida hace necesario dotar a la zona de mezclado de los mecanismos de control necesarios para mantener el depósito intermedio, el cual contiene el líquido ya mezclado, dentro de los niveles que aseguren un suministro ininterrumpido a todas las celdas de envasado a las cuales provea. La celda mezcladora deberá conocer en todo momento el estado del depósito, para ello se hace necesario el uso de comunicación por eventos con las celdas de llenado asociadas. Cada vez que una celda de llenado extrae mezcla del depósito, el programa del PLC de ésta envía un mensaje al PLC de la celda de mezclado notificando de la cantidad de líquido a extraer. La celda de mezclado mantiene una variable de estado con el nivel de líquido en el depósito según las extracciones de las celdas que así efectúen dicha operación. En base a esta información, la celda de llenado mantendrá el nivel adecuado de líquido en el depósito intermedio según la demanda del mismo lanzando sucesivas ejecuciones secuenciales del proceso *batch* de mezcla anteriormente explicado.

## 4. Presupuesto

Los elementos utilizados para la construcción de la planta propuesta son los siguientes.

- Bomba Watson-Marlow 720RE NEMA 4X: bombas peristálticas utilizadas para el llenado del depósito de mezclado, depósito de almacenamiento intermedio y depósito vertical de llenado del módulo de la embotelladora. Permite un control de flujo variable, permitiendo obtener un flujo de 2.000 litros/hora a 2 bares de



presión trabajando a máximo caudal. Utiliza un motor *brushless* de continua. Permite el control de todo tipo de fluidos ya que incorpora protección anti corrosión. Medidor de flujo incorporado. Control directo a través de RS485 o mediante Profibus DP.

- Variador de frecuencia Danfoss VLT2800: utilizado para el control de la velocidad del motor de la cinta transportadora. Se trata de uno de los convertidores más pequeños del mercado. Incorpora un control en bucle cerrado PID, seguimiento automático de la referencia de velocidad y cortos tiempos de respuesta y parada. Incluye un ventilador de doble rodamiento y control automático del mismo para su refrigeración. Su reducido tamaño y peso lo hace apto para ser colocado en cualquier posición, permitiendo colocarlo cerca del motor de la cinta y logrando de este modo un sistema lo más compacto posible. Habilita para su conexión un puerto RS485, de forma adicional funciona también el protocolo de comunicación libre de Danfoss. Asimismo también implementa un esclavo Profibus DP.
- PLC Siemens SIMATIC S7-300: PLC totalmente configurable de gama media/baja. Contiene una CPU 3314C-2PN/DP compatible con Profibus DP y Profinet con 192 KB de memoria y 60 ns de tiempo de ciclo de instrucción. Hace posible la programación desde niveles superiores de la jerarquía en planta (*Profibus FMS*) o de forma local por el operario mediante una tarjeta MMC.
- Electroválvulas SMC VXZ2230-03F-3DR1: Válvulas para el terminal de llenado de botellas y el accionamiento del pistón neumático. Accionadas en modo de operación todo/nada, entrada 220 VAC.
- Sensores de nivel PEPPERL+FUCHS UC2000-30GM-IUR2-V15. Basado en ultrasonidos, utilizado para el control de altura en los depósitos.

No se han tenido en cuenta ni la tarjeta PCIe *Profibus* del PC Host ni el bridge a *Profinet* ya que no forman parte de los materiales necesarios para la célula de mezclado y embotellado de por sí, si no que se parte de la base de que la planta industrial en la cual se van a instalar dichas células ya dispone de la infraestructura de buses necesaria así como las otros módulos que conforman la nave, infraestructura a la cual será añadido el subsistema en este documento expuesto. A efectos de cómputo de costes se han considerado los actuadores, sensores y PLCs, en definitiva, los elementos relacionados con la implementación bajo *Profibus*. Habrá que añadir, por tanto, los costes del resto de la maquinaria. Teniendo en cuenta los elementos anteriormente listados la siguiente tabla muestra el coste de la instalación.

Item	Cantidad	Precio unitario (EUR)	Total
Bomba Watson-Marlow 720RE NEMA 4X	4	4.200	16.800
Variador Danfoss VLT2800	1	600	600
PLC Siemens SIMATIC S7-300	2	2400	4800
Electroválvulas SMC VXZ2230-03F-3DR1	3	400	1200
Sensores de nivel PEPPERL+FUCHS UC2000-30GM-IUR2-V15	3	550	1650
Total...			25.050

## 5. Conclusiones

### 5.1. Idoneidad del diseño

Se ha conseguido, pues, diseñar una estructura de bus que cumple los requisitos especificados para el problema. La estructura jerárquica propuesta permite un grado bastante amplio de escalabilidad y modularidad al tiempo que ofrece la posibilidad de elegir entre varios dispositivos distintos compatibles entre sí, lo que evita tener que ceñirse obligatoriamente a un único fabricante o proveedor.

Como desventaja se podría citar una complejidad elevada del bus del cual, aunque algunas de las características más avanzadas son imprescindibles o muy convenientes, no se aprovecha en general el 100% de las posibilidades que ofrece, lo cual supone un aumento de precio con respecto a alternativas menos complejas. De esto se discutirá ampliamente en la sección 5.2.

### 5.2. Alternativas

Por supuesto, la selección de Profibus no es la única alternativa viable para este sistema. Existe una gran selección de buses en el mercado cada una con sus fortalezas y debilidades. En esta sección se comentarán otras posibilidades de diseño para el sistema propuesto.

#### 5.2.1. Modbus

El competidor más directo para este caso sería **Modbus**, el cual se tuvo muy en cuenta como alternativa al Profibus finalmente usado. Ambos tienen en común el hecho de ser estándares ampliamente utilizados, existentes en multitud de dispositivos, por lo que ambos resuelven igualmente el problema de exclusividad. En cuestión de velocidad, pese a ofrecer tasas más bajas de transmisión son suficientes para la aplicación. Del mismo modo las limitaciones en distancia son bastante similares ofreciendo, de hecho, Modbus más alternativas de capa física.

Por otro lado, Modbus ofrece como ventaja su mayor sencillez, lo cual abarata los equipos. Otra ventaja

sería la posibilidad de implementar toda o la mayor parte de la red mediante TCP/IP sobre Ethernet, lo cual facilita las instalaciones.

Las desventajas, sin embargo, vienen derivadas de la sencillez del protocolo. Por un lado, el protocolo Modbus no ofrece características nativas para una jerarquización como la que se ha visto en el diseño propuesto. Si bien es cierto que dicha jerarquía se puede emular mediante el uso de TCP/IP y gateways, el mismo protocolo TCP/IP posee una latencia intrínseca ya no sólo usualmente elevada, sino no determinista, lo cual puede suponer un problema para la temporización de las válvulas y bombas como se comentó en el apartado 2.2. Por otro lado en dicho apartado se comenta la conveniencia de la existencia de un mecanismo de notificación de eventos ya no sólo para notificaciones habituales durante el uso sino para mecanismos de emergencia, que no tienen necesidad de ser consultados continuamente. Modbus no ofrece dicha característica, por lo que habría que malgastar parte del ya escaso ancho de banda en estas tareas que, en la mayoría de los casos, no devolverían resultado alguno.

### 5.2.2. Otras alternativas

Otra posibilidad viable habría sido obviar la capa actualmente utilizada por el Profibus DP y conectar los dispositivos directamente al PLC bien mediante señales analógicas normales, un lazo de corriente o algún sistema mixto como HART y centrar el uso de un fieldbus únicamente en la capa jerárquica de control. El principal problema es que se pierde la posibilidad de escalar el PLC si en algún momento fuese necesario hacer modificaciones al diseño de la cadena, al mismo tiempo que de necesitar máquinas distintas estas deberían soportar la misma clase de niveles o se haría necesario una reprogramación de los algoritmos de los PLC, lo cual supondría costes adicionales.

Interbus podría suponer una alternativa interesante, especialmente por su latencia determinista. Su topología en anillo, sin embargo supone una complejidad excesiva para la clase de sistema que se está diseñando.

Existen, desde luego, muchas más alternativas de las comentadas. La mayoría de ellas, sin embargo, se ciñen a uno o unos pocos fabricantes, lo cual dificultaría la escalabilidad del sistema y podría suponer un problema económico.

Es por todos estos factores por los que finalmente se ha decidido utilizar Profibus/Profinet y no otros buses.