

## EFFECTOS DEL ENLACE DE COMUNICACIÓN EN UN SISTEMA DE CONTROL BASADO EN RED UTILIZANDO PROFIBUS-DP

V. Casanova, J. Salt, V. Mascarós, A. Cuenca

*Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática  
Universidad Politécnica de Valencia  
Camino de Vera S/N, 46071 Valencia (España)*

**Resumen:** Los sistemas de control basados en red son un tipo especial de sistemas donde se utiliza un medio de comunicación compartido por distintos dispositivos y/o el controlador se encuentra alejado de la planta y es necesario un medio de comunicación fiable y seguro. En este artículo se describe mediante un modelo teórico el funcionamiento de un sistema de control basado en red que utiliza el protocolo PROFIBUS-DP, y se estudia mediante diversas implementaciones reales el efecto del ancho de banda de la red sobre las prestaciones del controlador cuando se varía la velocidad de transmisión. Se observan fenómenos como retrasos, pérdida de señales y prolongación del tiempo de aplicación de las acciones de control.  
*Copyright © 2006 CEA-IFAC*

**Palabras clave:** Sistemas de control basados en red, redes de comunicación, buses de campo, automatización industrial.

### 1. INTRODUCCIÓN

Debido al aumento de la complejidad de las plantas industriales, el número de dispositivos necesarios para su control (sensores, actuadores e instrumentación adicional), así como las distancias entre estos elementos, se han incrementado considerablemente. Con el objeto de reducir costes y mejorar la eficiencia se han desarrollado las arquitecturas distribuidas que exigen un medio de comunicación eficiente y seguro. Los buses de campo aparecen para proporcionar este servicio de comunicación en los sistemas de control de grandes plantas industriales, donde las largas distancias unidas al elevado número de procesos a controlar sugieren un sistema de control basado en red. Se trata de protocolos y tecnologías de comunicación utilizados en automatización y control de procesos industriales. Están adquiriendo importancia en la

transmisión de datos entre los módulos de entrada/salida descentralizados y los autómatas programables. En este sentido, uno de los buses de campo que mayor aceptación y difusión ha tenido es PROFIBUS.

Los sistemas de control basados en red, en adelante SCBR, (Halevi y Ray, 1988; Ray y Halevi, 1988; Liou y Ray, 1990; Halevi y Ray, 1990) son un tipo especial de sistemas de control donde el controlador se encuentra alejado físicamente de la planta y es necesaria la utilización de un medio de comunicación fiable y seguro, y/o además se comparte el medio de comunicación con otros dispositivos para reducir costes. En estos sistemas se deben tener en cuenta los efectos de la comunicación en el tratamiento de las señales, ya que influyen diversos factores (la velocidad de transmisión de la información por la red, la cantidad de información que se envía, la

política de arbitraje, el número de dispositivos que componen el sistema, la velocidad de la conversión A/D y D/A, etc.).

En la actualidad existen diferentes protocolos de comunicaciones. Ethernet (Tanenbaum, 1996) es un protocolo no determinista especialmente diseñado para la transmisión de grandes paquetes de información que utiliza el mecanismo CSMA/CD basado en la detección de colisiones. PROFIBUS (EN50170, 1998) y ControlNet (ControlNet Specifications, 1998) son ejemplos típicos de protocolos que utilizan el método del paso de testigo. Son protocolos deterministas ya que el tiempo máximo de espera antes de enviar un mensaje viene caracterizado por el tiempo de rotación del testigo. CAN es un protocolo CSMA/AMP basado en la prioridad de los mensajes cuyas principales aplicaciones se desarrollan en la industria del automóvil. La especificación DeviceNet (DeviceNet Specifications, 1997) está basada en el estándar CAN. En (Lian *et al.*, 2001) se presenta un estudio comparativo del funcionamiento temporal de estos tipos de protocolos de comunicaciones.

La figura 1 muestra una representación genérica de un SCBR. La variable controlada es medida utilizando un sensor y convertida a formato digital mediante un conversor A/D. El valor resultante se almacena en un registro interno, y permanece a la espera de ser enviado al controlador utilizando el enlace de comunicación. El parámetro  $T_s$  es el periodo de muestreo de la variable controlada. El controlador dispone de una cola de recepción donde se almacena el valor de la variable controlada recibida. A partir de esta señal, calcula la acción de control y la escribe en la cola de transmisión, con un periodo de muestreo  $T_c$ .

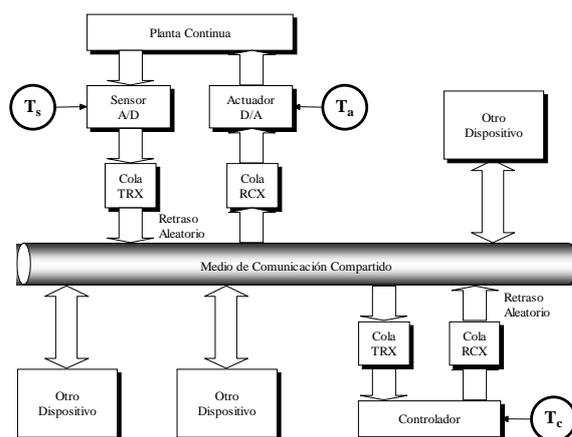


Figura 1. Sistema de control basado en red genérico.

En función del protocolo del medio de comunicación, cuando el controlador dispone del derecho de transmisión envía la señal de control a la planta, donde es almacenada en la cola de recepción. Dicho valor es convertido a analógico y aplicado a la planta mediante un actuador, con periodo  $T_A$ . En el acceso

al medio compartido aparece un retraso que, en el caso más general, puede ser de naturaleza aleatoria.

En (Casanova y Salt, 2003; Casanova y Salt, 2004; Salt y Casanova, 2004; Mascarós *et al.*, 2004; Casanova *et al.*, 2004;) se pueden consultar algunos de los trabajos previos de los autores sobre este tipo de sistemas de control. En este trabajo se analiza desde un punto de vista práctico el efecto del ancho de banda del enlace de comunicación sobre las prestaciones del controlador cuando se varía la velocidad de transmisión en un sistema de control real basado en PROFIBUS-DP, compuesto por un nodo maestro-DP y un nodo esclavo-DP.

En el apartado 2 se describe mediante un modelo teórico el funcionamiento de un sistema de estas características y se formalizan los parámetros que definen su comportamiento. En el apartado 3 se analizan los resultados obtenidos cuando se implementa en un SCBR real, dos controladores discretos y se estudia su funcionamiento para distintas velocidades de transmisión, observándose fenómenos como retrasos, pérdida de información y prolongación del tiempo de aplicación de las señales de control. Las principales conclusiones del trabajo presentado, así como los trabajos futuros previstos se detallan en el apartado 4.

## 2. ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO DE UN SCBR QUE UTILIZA PROFIBUS-DP

### 2.1 La arquitectura PROFIBUS-DP.

Profibus (EN50170, 1998; Sempere *et al.*, 2000; Weigman y Kilian, 2000; Mandado *et al.*, 2004) es un bus de campo abierto que cumple el estándar europeo EN50170 (EN50170, 1998). Proporciona tres versiones diferentes del protocolo de comunicación: FMS, DP, PA. PROFIBUS-FMS está diseñado para comunicaciones industriales a nivel de celda de fabricación. PROFIBUS-DP está diseñado para la comunicación entre controladores programables y dispositivos de entrada/salida a nivel de campo distribuidos por la red a muy alta velocidad de transmisión y eficiencia. PROFIBUS-PA es una ampliación de PROFIBUS-DP que permite seguridad intrínseca y la alimentación de los dispositivos a través del propio bus.

Los dispositivos que componen un sistema basado en PROFIBUS-DP pueden ser maestros-DP (controlan la comunicación de datos en el bus) o esclavos-DP (no tienen derecho de acceso al bus, y sólo pueden enviar mensajes a su dispositivo maestro-DP cuando éste realiza demandas para ello). El medio de transmisión más utilizado se basa en el estándar EIA RS-485, que utiliza un cable de par trenzado que suele estar apantallado. La velocidad de transmisión del bus es configurable, de forma que la máxima longitud del segmento de bus depende de la velocidad

de transmisión, según se describe en la tabla 1 (Weigman y Kilian, 2000).

Tabla 1 Máxima longitud del segmento de bus en función de la velocidad de transmisión.

Velocidad de transmisión	Máxima longitud
9.6 a 187.5 Kbit/s	1000 m
500 Kbit/s	400 m
1.5 Mbit/s	200 m
12 Mbit/s	100 m

El protocolo de control de acceso al medio utiliza un mecanismo híbrido: el paso de testigo entre los maestros del bus y el procedimiento de comunicación de cada maestro con sus esclavos cuando posee el testigo. Los nodos maestros-DP conectados a la red PROFIBUS forman un anillo lógico en orden ascendente de acuerdo con su dirección de bus.

El testigo proporciona el derecho para acceder al medio de comunicación, y se pasa entre los nodos maestros-DP mediante una trama especial. El parámetro  $T_{TR}$  (Token Rotation Time) representa el tiempo máximo de rotación del testigo por todo el anillo lógico. Cuando un nodo maestro-DP recibe el testigo tiene derecho de comunicación por el bus, y autoriza la comunicación a los nodos esclavos-DP que tiene asignados. A grandes rasgos, el protocolo PROFIBUS-DP funciona, básicamente, de acuerdo con las siguientes especificaciones:

- Cada maestro-DP mide continuamente el intervalo de tiempo  $T_{RR}$  (Real Token Rotation Time) durante el que no está en posesión del testigo lógico.
- Cuando un nodo maestro-DP recibe el testigo, calcula la diferencia entre  $T_{TR}$  y  $T_{RR}$ , obteniendo el tiempo  $T_{TR} - T_{RR}$ , durante el que puede mantener el testigo. Las órdenes de comunicación que se ejecutan dependen del tiempo  $T_{TR} - T_{RR}$  calculado y de la prioridad de éstas.

Entre los estudios temporales relacionados con PROFIBUS se pueden consultar los siguientes trabajos (Tovar y Vasques, 1999a; Tovar y Vasques, 1999b; Cavalieri *et al.*, 2002; Monforte *et al.*, 2002).

## 2.2 Descripción del modelo de funcionamiento.

Fundamentalmente, la utilización de los SCBR, viene justificada por dos motivos:

- La compartición del medio de comunicación entre distintos elementos del sistema conlleva una reducción de costes de implementación.
- Las considerables distancias entre los dispositivos que forman el bucle de control, así como los ambientes industriales agresivos, requieren de un medio de comunicación fiable y seguro.

En un SCBR el intercambio de información entre el

controlador y la planta tiene lugar a través de un enlace de comunicación de uso no exclusivo. En este trabajo se considera que el algoritmo de control se encuentra implementado en un nodo con capacidad de cálculo, mientras que la aplicación de las acciones de control y la medida de la variable controlada tiene lugar en un nodo esclavo-DP sin capacidad de cálculo. En la figura 2 se muestra la estructura de un bucle de control básico compuesto por un nodo maestro-DP y un nodo esclavo-DP que se encuentran integrados dentro de un sistema de control en red basado en PROFIBUS-DP, de modo que para la transmisión recíproca de información utilizan un bus de campo compartido. La tarea cíclica de control se desarrolla en el maestro-DP, con un periodo  $T_C$ . Para la ejecución de esta tarea el controlador necesita las medidas de las variables de la planta a controlar que se encuentran disponibles en su registro de almacenamiento de entrada. A su vez, las acciones de control calculadas son almacenadas en su registro de almacenamiento de salida.

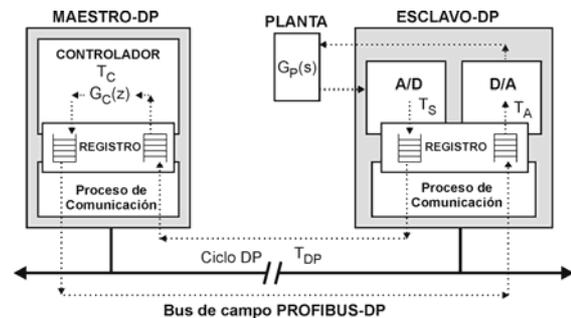


Figura 2. Estructura de un bucle de control integrado en un sistema de control basado en red que utiliza Profibus-DP.

En el nodo esclavo-DP tiene lugar la aplicación directa de las señales de control sobre la planta a controlar y la medida de las variables necesarias para la ejecución del algoritmo de control. Las acciones de control que se deben aplicar a la planta están disponibles en el registro de almacenamiento de entrada del esclavo-DP en formato digital. Para ser aplicadas a la planta es necesario un convertor D/A que funciona con un periodo de actuación  $T_A$ . Por otro lado, la variable controlada de la planta se mide mediante un convertor A/D, que funciona con un periodo de muestreo  $T_S$ . Los valores medidos son almacenados en el registro de almacenamiento de salida del esclavo-DP. Tanto las tareas de control como las tareas de conversión A/D y D/A trabajan sobre los registros de almacenamiento.

El protocolo PROFIBUS-DP es el encargado de transmitir la información a través del bus de campo entre los registros del maestro-DP y del esclavo-DP, de forma independiente con respecto a las tareas de éstos. Sin embargo, el bus también puede ser utilizado por otros dispositivos, por lo que el medio debe ser compartido.

En lo que respecta al sistema de transmisión de información, se tienen en cuenta las siguientes consideraciones:

- La capacidad de los registros de almacenamiento para una variable determinada, tanto de entrada como de salida, es la unidad. Es decir, no se forman colas ni en los emisores ni en los receptores.
- Aunque PROFIBUS-DP es un protocolo determinista, el periodo del ciclo DP de comunicación no es constante. Por simplicidad, y teniendo en cuenta que el objetivo de este trabajo es incluir el efecto del enlace de comunicación en un bucle de control, además de otros factores típicos de los sistemas de control (conversión A/D, D/A,...), se ha considerado que la transmisión de información por el bus se realiza de forma cíclica con periodo  $T_{DP}$ .

Como trabajo futuro está previsto estudiar mediante herramientas estadísticas y de análisis en frecuencia, la variabilidad del tiempo de ciclo DP para mejorar el modelo teórico que se plantea posteriormente en el apartado 2.3.

Mediante la realización de una serie de pruebas sobre el equipo industrial descrito en el apartado 3.1 se ha comprobado, como era de esperar, que se cumple la relación  $T_{DP} < T_{TR}$ , ya que  $T_{TR}$  representa el tiempo máximo de rotación del testigo. El periodo de comunicación  $T_{DP}$  y el tiempo máximo de rotación del testigo  $T_{TR}$  dependen fundamentalmente de los tres factores indicados a continuación:

- a) La cantidad de nodos que comparten la red.
- b) La cantidad de información que deben transmitir los nodos.
- c) La velocidad de transmisión de la información a través de la red, cuyo valor máximo viene determinado por la distancia del segmento.

Así pues, un aumento del número de dispositivos que comparten la red y/o una disminución de la velocidad de transmisión (motivada por las largas distancias de los segmentos) provocan un aumento del tiempo  $T_{DP}$  y de  $T_{TR}$ , ya que se necesita más tiempo para establecer el intercambio de información entre los distintos nodos que forman la red.

### 2.3 Formalización de los parámetros que definen el funcionamiento de un SCBR que utiliza Profibus-DP.

A continuación se modela el funcionamiento de un bucle de control que utiliza el protocolo Profibus-DP como enlace de comunicación entre el controlador y la planta. En la figura 3 se representan en forma de diagrama los distintos parámetros temporales que intervienen en un bucle de control de estas características. Los parámetros que condicionan el funcionamiento del sistema de control son:

- Periodo de control ( $T_C$ ): Es el periodo del reloj que gobierna la ejecución de la tarea de control.
- Periodo del sensor ( $T_S$ ): Es el periodo de reloj que gobierna los instantes de muestreo del convertor A/D.
- Periodo del actuador ( $T_A$ ): Es el periodo del reloj que gobierna los instantes de actuación del convertor D/A.
- Periodo de comunicación ( $T_{DP}$ ): Representa el periodo de tiempo que transcurre entre cada inicio del ciclo de comunicación del maestro-DP con sus esclavos-DP. En un sistema multimaestro, representa el tiempo comprendido entre cada recepción en el maestro-DP del testigo que le da el derecho de utilización de la red.
- Desfase temporal controlador-sensor ( $\Delta_S$ ): Los relojes de control y sensor no están sincronizados al tratarse de dispositivos que funcionan de forma independiente.  $\Delta_S$  representa el tiempo transcurrido

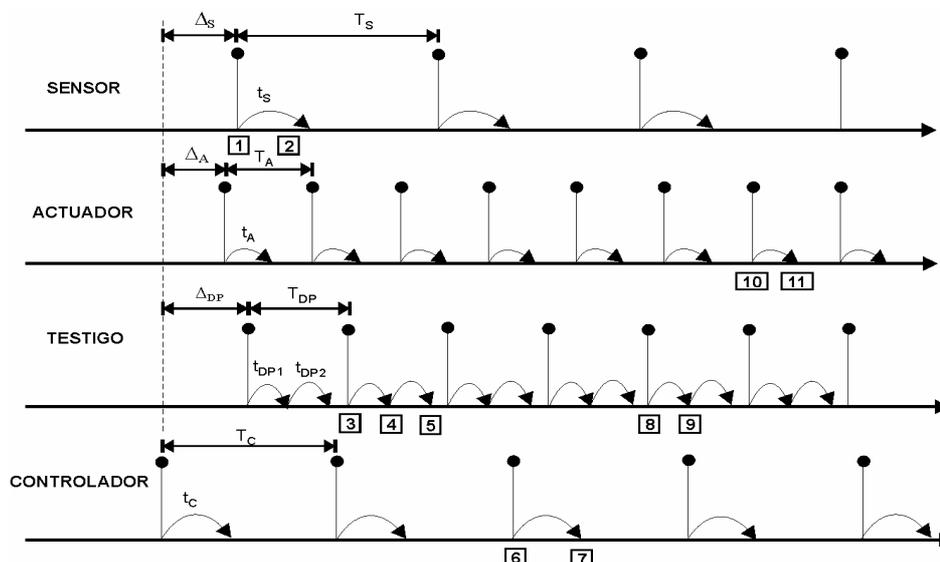


Figura 3. Representación temporal de los parámetros que definen el funcionamiento de un bucle de control integrado en un SCBR.

desde el instante de control hasta el instante de muestreo. Este desfase, puede ser constante o variable, dependiendo de la relación entre los periodos  $T_C$  y  $T_S$ . Este desfase siempre es menor que el menor entre  $T_C$  y  $T_S$ .

- Desfase temporal controlador-actuador ( $\Delta_A$ ): Los relojes del controlador y actuador tampoco están sincronizados. Este parámetro representa el tiempo transcurrido desde el instante de control hasta el instante de actuación. El desfase  $\Delta_A$  puede ser constante o variable, y es menor que el menor entre  $T_C$  y  $T_A$ .
- Desfase temporal controlador-comunicación ( $\Delta_{DP}$ ): El reloj del controlador y el periodo de la comunicación a través del bus no están sincronizados. Este parámetro representa el tiempo transcurrido desde el instante de control hasta el instante de recepción del testigo en el maestro-DP que le da derecho sobre el bus. El desfase  $\Delta_{DP}$  puede ser constante o variable, y es menor que el menor entre  $T_C$  y  $T_{DP}$ .
- Tiempo de cálculo ( $t_C$ ): Es el tiempo que transcurre desde el momento en que se inicia la ejecución de la tarea de control hasta que la acción de control calculada es almacenada en el registro de almacenamiento de salida del maestro-DP.
- Tiempo de medida ( $t_S$ ): Representa el tiempo comprendido entre el inicio de la conversión A/D y la escritura del valor obtenido en el registro de almacenamiento de salida.
- Tiempo de actuación ( $t_A$ ): es el tiempo comprendido entre el inicio de la conversión D/A y su finalización, momento en el que la señal de control es aplicada a la planta.
- Tiempo de transmisión ( $t_{DP1}$ ): Cuando el maestro-DP inicia un ciclo de transmisión de información por el bus, en primer lugar se envía la información desde el maestro-DP hasta el esclavo-DP. Esta transmisión no es inmediata. El parámetro  $t_{DP1}$  representa el tiempo comprendido entre el inicio del ciclo de transmisión y el instante de tiempo en que finaliza el envío de información en el sentido maestro  $\rightarrow$  esclavo, momento en el que el registro de almacenamiento de entrada del esclavo-DP se ha actualizado.
- Tiempo de transmisión ( $t_{DP2}$ ): Cuando el maestro-DP inicia un ciclo de transmisión de información por del bus, éste envía la información al esclavo-DP y éste responde al maestro-DP con una trama de reconocimiento que incluye la información que se desea enviar en la dirección esclavo  $\rightarrow$  maestro, y así se actualiza el registro de entrada del maestro-DP. El parámetro  $t_{DP2}$  representa el tiempo que transcurre entre la finalización de la transmisión de la información en el sentido maestro  $\rightarrow$  esclavo y la finalización de la transmisión de información en el sentido esclavo  $\rightarrow$  maestro, momento en el que el registro de almacenamiento de entrada del maestro-DP se ha actualizado.

En general, el peso de cada uno de los retrasos y periodos del SCBR depende de la relación con respecto al periodo de control, pero a su vez, la elección del periodo de control depende de la dinámica de la planta que se desea controlar y de las especificaciones de control (sobrepulso máximo, tiempo de establecimiento, etc.). El efecto de los parámetros  $T_A$ ,  $t_A$ ,  $T_S$  y  $t_S$  se puede reducir utilizando equipos industriales de calidad que funcionen con periodos de conversión A/D y D/A pequeños. El periodo  $T_{DP}$  depende fundamentalmente de la cantidad de dispositivos que comparten el medio de comunicación, de la cantidad de información que se debe enviar y de la velocidad de transmisión.

En cuanto al número de dispositivos que comparten la red, se considera que se utiliza la menor cantidad posible siempre que se cumplan las necesidades de la aplicación. En cuanto a la cantidad de información, en una aplicación real, por ejemplo, cuantos más módulos analógicos y digitales de entrada/salida se utilicen mayor será la cantidad de información transmitida. Sin embargo, obviamente no se van a utilizar módulos innecesarios. En lo que respecta a la velocidad de transmisión, para conseguir reducir al máximo su efecto se debe configurar la máxima velocidad posible, cuyo valor viene limitado por la longitud del segmento de bus (tabla 1).

#### 2.4 Etapas de una señal analógica.

Mediante los números recuadrados dispuestos en la figura 3 es posible analizar las etapas que sigue una señal analógica desde el instante en que es capturada en un canal de un módulo de entradas analógicas hasta que es escrita, una vez procesada, en un canal de un módulo de salidas analógicas.

En el instante 1 (figura 3) el dato comienza a ser convertido por el canal A/D. En el instante 2 finaliza la conversión, y el dato queda almacenado en el registro de salida del esclavo-DP. En el instante 3 el maestro-DP inicia un ciclo de transmisión y comienza el envío de información en el sentido maestro  $\rightarrow$  esclavo. En 4 se inicia la transmisión de información en el sentido esclavo  $\rightarrow$  maestro, y el dato medido por el sensor llega al maestro-DP en 5. En el siguiente ciclo de transmisión se vuelve a enviar el mismo valor al maestro-DP, ya que el sensor todavía no ha realizado una nueva lectura.

En el instante 6 comienza la ejecución de la rutina del maestro-DP. Lee el dato del registro de lectura, lo procesa y el resultado lo vuelve a escribir en el registro de escritura, finalizando su ejecución en 7. El maestro-DP vuelve a tener derecho sobre la red en el instante 8, y comienza a transmitir el dato procesado, que llega al registro del esclavo-DP en el instante 9. En 10 comienza la conversión D/A, y finaliza en el

instante 11, momento en el que la señal analógica es aplicada a la planta. En (Mascarós *et al.*, 2004; Casanova *et al.*, 2004) se estudian distintas aplicaciones donde se explican mediante diagramas similares al de la figura 3 las transformaciones que sufren las señales en su camino por un SCBR que utiliza el protocolo PROFIBUS-DP.

Se define  $t_R$  como el tiempo que transcurre entre el inicio de la captura de una muestra en un canal de entradas analógicas y la aplicación a la planta de la acción de control correspondiente en un canal de salidas analógicas. Teniendo como referencia el diagrama representado en la figura 3, el retraso  $t_R$  resulta ser la suma de los siguientes tiempos:

- El tiempo de medida  $t_S$  (intervalo de tiempo comprendido entre los instantes 1 y 2).
- El tiempo de espera hasta el inicio de la transmisión de información por el bus en el sentido esclavo-maestro (intervalo de tiempo comprendido entre los instantes 2 y 4).
- El tiempo de transmisión  $t_{DP2}$  (intervalo de tiempo comprendido entre los instantes 4 y 5).
- El tiempo que transcurre desde que llega el dato al registro del maestro-DP hasta que es solicitado por la rutina del controlador (intervalo de tiempo comprendido entre los instantes 5 y 6).
- El tiempo de cálculo  $t_C$  (intervalo de tiempo comprendido entre los instantes 6 y 7).
- El tiempo de espera hasta el inicio de la transmisión de información por el bus (intervalo de tiempo comprendido entre los instantes 7 y 8).
- El tiempo de transmisión  $t_{DP1}$  (intervalo de tiempo comprendido entre los instantes 8 y 9).
- El tiempo que transcurre desde que el dato es escrito en el registro del módulo de salidas analógicas hasta que se inicia la conversión D/A (intervalo de tiempo comprendido entre los instantes 9 y 10).
- El tiempo de actuación  $t_A$  (intervalo de tiempo comprendido entre los instantes 10 y 11).

Teniendo en cuenta el funcionamiento del sistema de control basado en red, el tiempo  $t_R$  es variable y está acotado entre un valor máximo y un valor mínimo. El valor mínimo de  $t_R$  viene dado por la expresión (1). Este caso concreto tiene lugar cuando los intervalos de tiempo 2-4, 5-6, 7-8 y 9-10 de la figura 3 son nulos.

$$t_{Rmin} = t_S + t_{DP2} + t_C + t_{DP1} + t_A \quad (1)$$

El valor máximo de  $t_R$  viene dado por la expresión (2). Esto ocurre cuando los intervalos de tiempo 2-4, 5-6, 7-8 y 9-10 de la figura 3 son máximos. Es decir, el intervalo de tiempo 2-4 se corresponde con el periodo  $T_{DP}$ , el intervalo 5-6 con el periodo  $T_C$ , el intervalo 7-8 con el periodo  $T_{DP}$  y el intervalo 9-10 con el periodo  $T_A$ .

$$t_{Rmax} = t_S + T_{DP} + t_{DP2} + T_C + t_C + T_{DP} + t_{DP1} + T_A + t_A \quad (2)$$

En una aplicación real, el valor de  $t_R$  va a depender de cada uno de los parámetros que lo definen. Por ejemplo, en el equipo industrial utilizado en las aplicaciones presentadas en este trabajo, que se describe en el apartado 3.1, los valores aproximados de los parámetros son los que se relacionan en la tabla 2.

**Tabla 2 Valores aproximados de los parámetros.**

Parámetro	Valor
$T_S$	40 ms
$t_S$	15ms
$T_A$	1 ms
$t_A$	Despreciable
$T_C$	Configurable
$t_C$	Despreciable
$T_{DP}$ (1.5Mbits/s)	1 ms
$t_{DP1} \approx t_{DP2}$ (1.5Mbits/s)	Despreciable
$T_{DP}$ (93.75Kbits/s)	10 ms
$t_{DP1} \approx t_{DP2}$ (93.75Kbits/s)	4 ms
$T_{DP}$ (19.2Kbits/s)	40 ms
$t_{DP1} \approx t_{DP2}$ (19.2Kbits/s)	18 ms
$T_{DP}$ (9.6KBbits/s)	95 ms
$t_{DP1} \approx t_{DP2}$ (9.6KBbits/s)	45 ms

### 3. EFECTOS DEL ENLACE DE COMUNICACIÓN EN UN BUCLE DE CONTROL INTEGRADO EN UN SCBR: IMPLEMENTACIÓN REAL

En este apartado se analizan los efectos del enlace de comunicación en un bucle de control implementado en un SCBR que utiliza el protocolo PROFIBUS-DP. Para ello se implementan dos controladores discretos en un equipo industrial descrito en el apartado 3.1, que está compuesto por un nodo maestro-DP y un nodo esclavo-DP. Es un ejemplo típico de un bucle de control donde el controlador se encuentra alejado considerablemente de la planta y necesita un enlace de comunicación fiable y seguro. Con el propósito de controlar una planta cuya función de transferencia sea de orden superior se ha montado un circuito eléctrico compuesto por resistencias, condensadores y amplificadores operacionales. La función de transferencia de este sistema viene dada por la siguiente expresión:

$$G_P(s) = \frac{1}{0.001 \cdot s^3 + 0.05 \cdot s^2 + 0.6 \cdot s + 1} \quad (3)$$

donde la acción de control es una señal de tensión eléctrica medida en voltios y la variable de salida es también una señal de tensión medida en voltios. Para el control de este sistema se propone el siguiente PID continuo, con el que se obtiene un tiempo de estabilización de unos 0.8 segundos:

$$G_{PID}(s) = 4.44 \cdot \left( 1 + 0.027 \cdot s + \frac{1}{0.5286} \cdot \int_0^r e(\tau) \cdot d\tau \right) \quad (4)$$

En el apartado 3.2 se implementa este PID discretizado con un periodo de 50 ms (5), y se varía la velocidad de transmisión para estudiar este efecto sobre la respuesta del sistema. En el apartado 3.3 también se implementa el PID, pero en este caso discretizado con un periodo de 100 ms (6), y también se varía la velocidad de transmisión de la red. En función de la relación que aparece entre los distintos periodos del sistema de control ( $T_C$ ,  $T_{DP}$ ,...) aparecen una serie de fenómenos como retrasos, pérdidas de información y prolongación del tiempo de aplicación de las señales de control que se analizan en los siguientes apartados. El hecho de disminuir la velocidad de transmisión origina un aumento en el valor del ciclo DP de comunicación. Si en lugar de disminuir la velocidad se incluyeran dispositivos que comparten la red también aumentaría el valor del tiempo de ciclo DP.

En la figura 4 se representa la simulación del bucle de control con el PID continuo (4), con el PID discretizado con un periodo de 50 ms (5) y con el PID discretizado con un periodo de 100ms (6). Se trata de una simulación en condiciones ideales, es decir con los relojes del sistema perfectamente sincronizados, sin latencias de comunicación y sin retrasos debidos a los procesos de conversión A/D, D/A y al proceso de cálculo de la acción de control.

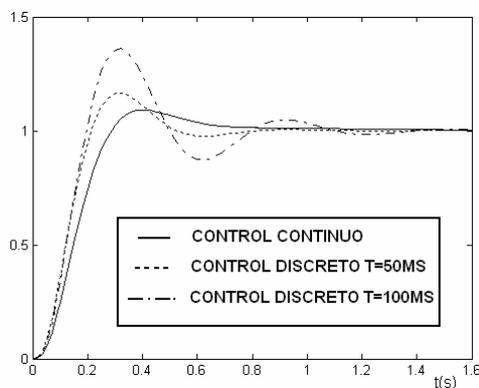


Figura 4. Simulación ideal del bucle de control con el PID continuo, discretizado con un periodo  $T_C=50$  ms y discretizado con un periodo  $T_C=100$  ms.

### 3.1 Descripción del equipo industrial.

El equipo industrial utilizado para el desarrollo del presente trabajo es un sistema SIMATIC S7-300 (figura 5). Se trata de un sistema de control en red formado por un nodo maestro-DP y un nodo esclavo-DP, que utiliza el protocolo PROFIBUS-DP como enlace de comunicación. Para este SCBR en particular, los tiempos  $T_{TR}$  calculados por el programa de configuración y programación, en función de la velocidad de transmisión, son los especificados en la tabla 3. En el nodo esclavo-DP de

este SCBR se dispone de un módulo de ocho canales de entradas analógicas que posee un solo convertidor A/D interno y un multiplexor para conmutar entre los canales de entrada. Debido a las características del equipo utilizado, si se habitan los ocho canales (el número máximo permitido para el módulo en cuestión), el periodo de conversión A/D de cada canal es de 160 ms. Si se habilitan dos canales de entradas analógicas (el menor número permitido) la conversión A/D en estos canales del módulo del nodo esclavo-DP tiene lugar cada 40 ms. Por tanto, en la aplicación se habilitan dos canales de entradas analógicas para conseguir un periodo de muestreo lo menor posible. En lo que respecta al periodo de conversión D/A, éste es despreciable frente al periodo de conversión A/D y al periodo de control utilizado en las aplicaciones desarrolladas.

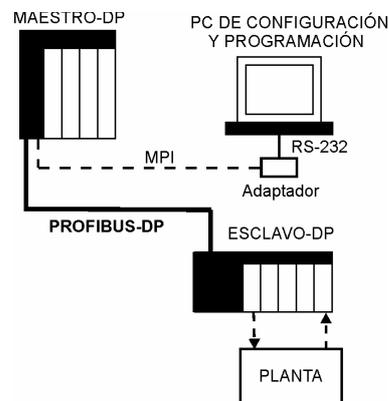


Figura 5. Esquema del equipo industrial utilizado en las implementaciones reales.

Tabla 3.  $T_{TR}$  en función de la velocidad de transmisión

Velocidad de transmisión	$T_{TR}$
12 Mbit/s	1.0 ms
1.5Mbit/s	1.1 ms
500Kbit/s	2.8 ms
187.5Kbit/s	6.3 ms
93.75 Kbit/s	12.7 ms
19.2Kbit/s	61.9 ms
9.6Kbit/s	123.8 ms

### 3.2 Caso de estudio A: Retraso, pérdida y prolongación del tiempo de aplicación de las acciones de control.

En este caso de estudio el PID continuo (4) diseñado se discretiza con un periodo de tiempo de 50 ms. La función de transferencia del PID discretizado es:

$$G_{PID}(z) = \frac{7.05 - 9.03 \cdot z^{-1} + 2.4 \cdot z^{-2}}{1 - z^{-1}} \quad (5)$$

El algoritmo del control PID se ejecuta en el nodo maestro-DP. Las señales de salida de la planta se miden en el nodo esclavo-DP, se transmiten al

maestro-DP a través de PROFIBUS-DP, se procesan, y se transmiten las acciones de control al nodo esclavo-DP que las aplica a la planta. En el módulo de entradas analógicas del esclavo-DP se activan dos de los ocho canales para conseguir un periodo de conversión lo menor posible. Se consigue así un periodo  $T_S$  de la señal de salida de la planta de 40 ms.

En la figura 6 se representan las respuestas del sistema utilizando el PID considerado (5), en función de la velocidad de transmisión de la red configurada cuando se aplica en la referencia una señal escalón unitario. Cuando se configura una velocidad de transmisión de 1.5Mbit/s, el tiempo máximo de paso de testigo calculado por el sistema de configuración y programación es  $T_{TR}=1.1$  ms (tabla 3). Puesto que  $T_{DP}<T_{TR}$ , el periodo  $T_{DP}$  es despreciable frente al periodo  $T_C$ . Aunque el efecto del enlace de comunicación es despreciable, en la respuesta obtenida hay más sobreoscilación que la resultante en la simulación ideal de la figura 4. Esto es así porque, en la simulación, el tiempo que transcurre entre la lectura de la variable de salida de la planta y su utilización por parte del algoritmo de control es cero. Sin embargo, en la aplicación práctica la variable de salida de la planta se mide cada 40 ms, y el algoritmo de control se ejecuta cada 50 ms.

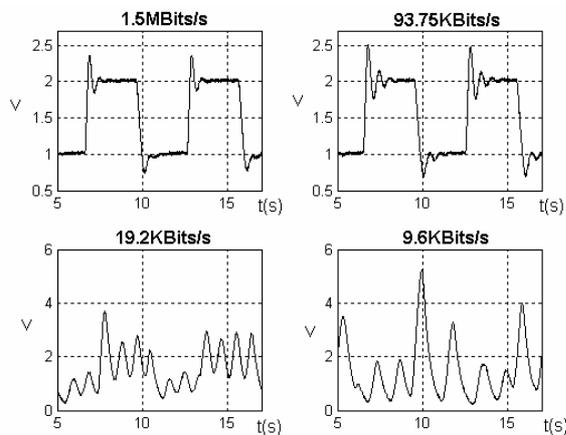


Figura 6. Respuestas reales: Control PID discreto (periodo de control 50 ms). Señal de salida de la planta en función de la velocidad de transmisión configurada.

Puesto que se trata de dos frecuencias diferentes, y además son relojes no sincronizados, aparece un retraso variable: el desfase temporal controlador-sensor que cumple la relación  $\Delta_S < T_S = 40$  ms. El desfase temporal controlador-actuador  $\Delta_A$  se considera despreciable, ya que en el equipo utilizado la conversión D/A es bastante más rápida que la conversión A/D.

Cuando se configura la red utilizada con una velocidad de transmisión de 93.75Kbit/s, el tiempo máximo de paso de testigo resulta  $T_{TR}=12.7$  ms (tabla 3). En la figura 6 se muestra la respuesta del sistema

en este caso. En esta aplicación se cumple la relación  $T_{DP} < T_C$ . La sobreoscilación y el tiempo de establecimiento han aumentado, ya que se ha incrementado el retraso variable introducido en el bucle de control al disminuir la velocidad de transmisión.

Si se utiliza una velocidad de transmisión de 19.2Kbit/s, el tiempo máximo de paso de testigo calculado por el programa de configuración es  $T_{TR}=61.9$  ms (tabla 3). Si se mide experimentalmente el valor de  $T_{DP}$ , resulta un valor aproximado de unos 40 ms. Se cumple la relación  $T_{DP} < T_C < T_{TR}$ . Sin embargo, el aumento del tiempo de retraso introducido en el bucle debido al aumento de los tiempos de transmisión llega a inestabilizar el sistema.

Para una velocidad de 9.6Kbit/s, el  $T_{TR}$  es de 123.8 ms (tabla 3). Medido experimentalmente,  $T_{DP}$  tiene un valor en torno a 95 ms. Como se cumple la relación  $T_{DP} > T_C$ , además del retraso introducido por el enlace de comunicación, aparecen otros fenómenos como pérdida de datos, repetición, etc., que son una fuente potencial de inestabilidad. Mediante la observación de las acciones de control se pueden apreciar estos fenómenos.

En la figura 7 se representa la acción de control calculada por el nodo maestro-DP y la señal de control aplicada realmente a la planta, en función de la velocidad de transmisión. Para poder ver las acciones calculadas por el PID, cuando finaliza la ejecución del algoritmo de control en el nodo maestro-DP, la acción de control se envía al esclavo-DP a través de PROFIBUS-DP, y a su vez se escribe en una salida analógica ubicada en el nodo maestro-DP. Si se considera despreciable el periodo de la conversión D/A, el tiempo durante el que la señal de control se aplica realmente es un múltiplo del periodo de comunicación  $T_{DP}$ .

Para una velocidad de 1.5Mbit/s, el efecto de la red de comunicación, con respecto al periodo de control es despreciable, y se puede considerar que la señal de control calculada por el PID es igual a la señal de control aplicada realmente a la planta. Como  $T_{DP} \ll T_C$ , la red transmite varias veces la misma señal de control desde el nodo maestro-DP hasta el nodo esclavo-DP. Cuando se disminuye la velocidad de transmisión aumenta el retraso introducido por la red. A menor velocidad, mayor retraso.

Sin embargo, cuando la velocidad utilizada es de 9.6Kbit/s, en la figura 7 se puede observar que no llegan a la planta todas las acciones calculadas por el nodo maestro-DP. En este caso se cumple la relación  $T_{DP} (\approx 95 \text{ ms}) > T_C$ , por lo tanto no todas las acciones de control llegan a la planta. Aquellas que llegan, solamente se han transmitido una vez por la red.

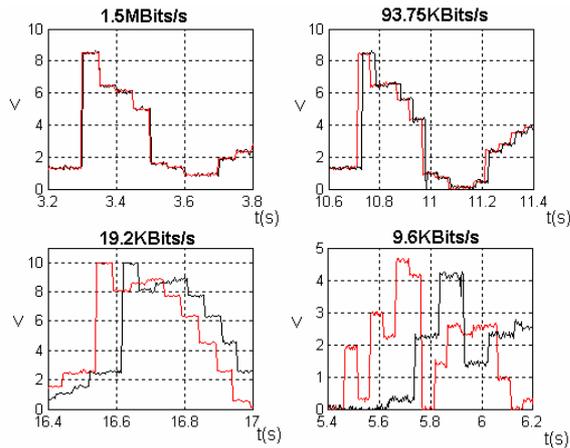


Figura 7. Control PID discreto (periodo de control 50 ms). Comparación entre la acción de control calculada por el PID y la acción de control aplicada realmente, en función de la velocidad de transmisión configurada.

En la figura 8 se enmarcan mediante un contorno con línea discontinua aquellas acciones calculadas que no llegan a aplicarse a la planta. Mediante un contorno con línea continua se enmarcan algunas de las acciones calculadas que sí llegan a la planta, y la flecha señala la acción de control realmente aplicada después de pasar por el bus. Si se considera el efecto de la conversión D/A despreciable, el periodo de actualización de la acción de control aplicada sobre la planta tiene lugar a periodo  $T_{DP}$ , tal como se puede observar con detalle en la figura 8.

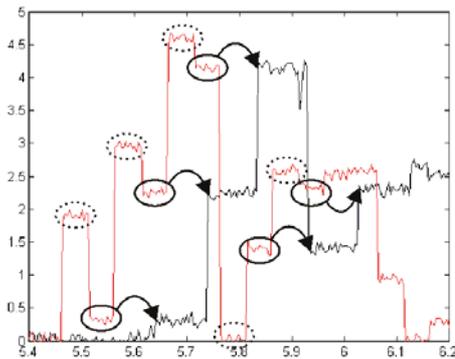


Figura 8. Comparación entre la acción de control calculada por el PID y la acción de control aplicada realmente (velocidad de transmisión: 9.6Kbits/s).

Por otro lado, la medida de la variable controlada almacenada en el registro de entrada del maestro-DP que es utilizada por el algoritmo de control en el maestro-DP, se actualiza lógicamente a periodo múltiplo de  $T_{DP}$ .

De modo que el retraso que aparece desde que se inicia la conversión A/D hasta que la medida es utilizada en el cálculo de la acción de control es variable, comprendido entre un valor mínimo ( $t_s + t_{DP2}$ ) y un valor máximo ( $t_s + T_{DP} + t_{DP2} + T_C$ ).

De acuerdo con el modelo teórico del apartado 2.2 se ha desarrollado un modelo de simulación en el entorno Matlab/Simulink para comparar los resultados reales con los simulados. Los parámetros utilizados en las simulaciones se han obtenido a partir de la documentación técnica y mediante observaciones del funcionamiento del sistema. En la figura 9 se presentan los resultados obtenidos mediante la simulación del SCBR en función de la velocidad de transmisión, donde se aprecia el parecido con los resultados reales de la figura 6.

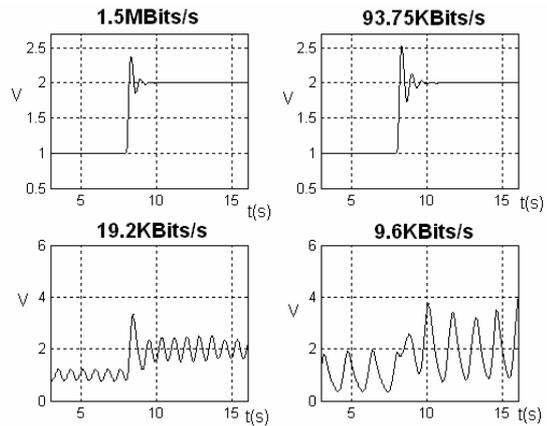


Figura 9. Simulación del bucle de control con el PID discreto (periodo de control 50 ms) mediante el modelo teórico del SCBR.

### 3.3 Caso de estudio B: Retraso y prolongación del tiempo de aplicación de las acciones de control.

En esta aplicación se discretiza el PID continuo para un periodo de 100 ms. La función de transferencia del PID discreto obtenido viene dada por la siguiente expresión:

$$G_{PID}(z) = \frac{6.06 - 6.42 \cdot z^{-1} + 1.2 \cdot z^{-2}}{1 - z^{-1}} \quad (6)$$

Este controlador se implementa en el nodo maestro-DP del equipo, y al igual que se ha hecho en el punto 3.2, se varía la velocidad de transmisión para ver el efecto de la red sobre la respuesta del sistema.

En la figura 10 se detallan los resultados reales obtenidos. Al igual que ocurre con el PID discretizado para un periodo de 50 ms, en los dos primeros casos la respuesta es estable, pero empeora debido al efecto del retraso variable introducido por el medio de comunicación, hasta hacerse inestable para unas velocidades de transmisión de 19.2Kbit/s y 9.6Kbit/s. En la figura 11 se muestran las acciones de control calculadas por el controlador en el nodo maestro-DP, y las señales que se aplican realmente a la planta.

En los tres primeros casos, se cumple la relación  $T_{DP} < T_C$ , y se observan los mismos fenómenos que en el caso de utilizar el controlador PID discretizado con

un periodo de 50 ms. Es decir, la disminución en la velocidad de transmisión provoca un aumento del retraso, que empeora la respuesta del sistema de control, hasta hacerlo inestable. En estas condiciones, el tiempo de aplicación de la acción de control es múltiplo de  $T_{DP}$ .

Cuanto menor sea el tiempo  $T_{DP}$ , el tiempo de aplicación de la acción de control más se aproximará al tiempo  $T_C$ . Sin embargo, para una velocidad de transmisión de 9.6 Kbit/s, el tiempo  $T_{DP}$  está entorno a 95 ms, y se sigue cumpliendo la relación  $T_{DP} < T_C$ . Si se analiza la acción de control aplicada en este caso, se observa que el tiempo de aplicación de esta señal se corresponde con el tiempo  $T_{DP}$ .

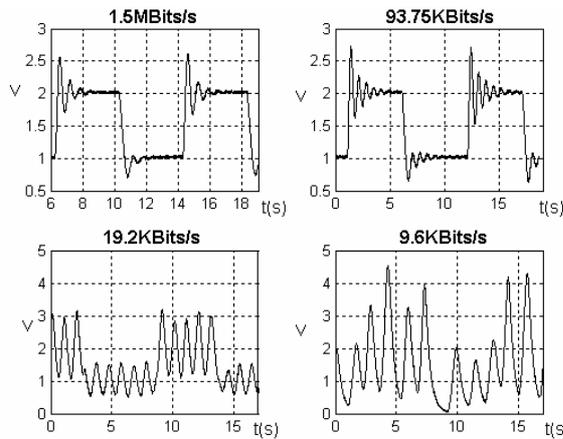


Figura 10. Control PID discreto (periodo de control 100 ms). Señal de salida de la planta en función de la velocidad de transmisión configurada.

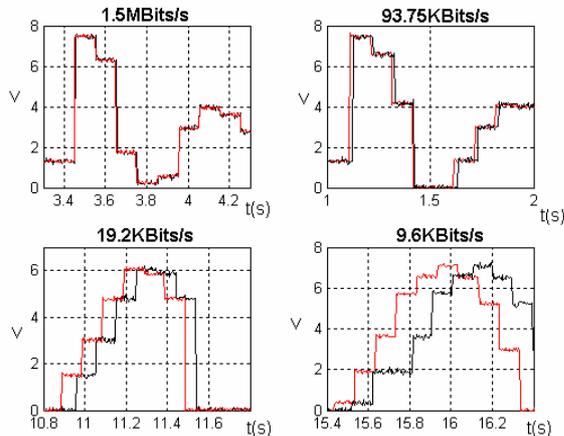


Figura 11. Control PID discreto (periodo de control 100 ms). Comparación entre la acción de control calculada por el PID y la acción de control aplicada realmente, en función de la velocidad de transmisión configurada.

Sin embargo, hay algunas ocasiones en las que debido a que se cumple que  $T_C=100$  ms y  $T_{DP}=95$  ms, se inician dos ciclos de comunicación entre dos ejecuciones consecutivas de la tarea de control y, por lo tanto, se transmite por el bus dos veces seguidas la misma acción de control. De esta forma, esta señal es aplicada en la planta un tiempo correspondiente a dos veces el periodo de comunicación  $T_{DP}$  (figura 11).

Mediante la representación de la figura 12 se explica este fenómeno. La acción de control calculada en el instante 1 se transmite por el bus y llega a la planta en 2, donde es aplicada después de la conversión D/A. Sin embargo, antes de calcular la siguiente acción de control se vuelve a enviar la misma señal, que llega a la planta en 3 donde es nuevamente aplicada. En la figura 12 se observa que la acción de control calculada en el instante 4 solamente se transmite una vez, y llega a la planta en 5. Por tanto, la acción calculada en el instante 1 permanece aplicada a la planta entre los instantes 2 y 5, lo cual supone aproximadamente dos veces el tiempo  $T_{DP}$ .

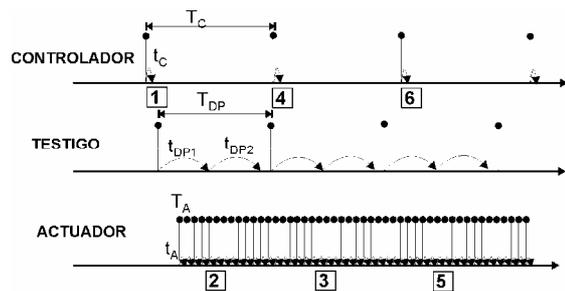


Figura 12. Representación temporal: transmisión de la misma acción de control dos veces.

Los resultados obtenidos mediante la simulación implementada de acuerdo con el modelo teórico, tal y como se ha descrito, se representan en la figura 13, para diferentes velocidades de transmisión de la información. Se puede observar el parecido con los resultados reales mostrados en la figura 10.

A la vista de las respuestas obtenidas en las aplicaciones presentadas en los apartados 3.2 y 3.3, se podría pensar que si la degradación se debiera fundamentalmente a la relación Tiempo de retraso/Tiempo de control, el segundo caso de estudio debería tener menor sobreimpulso. En realidad esto no es así ya que cuanto mayor es el periodo utilizado para discretizar el PID continuo, mayor es la degradación de la respuesta con respecto al caso del controlador continuo (figura 4).

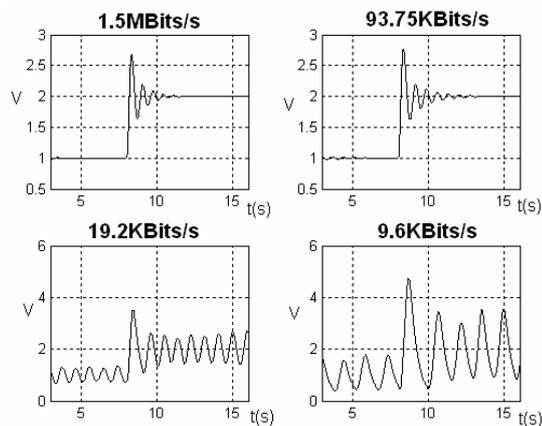


Figura 13. Simulación del bucle de control con el PID discreto (periodo de control 100 ms) mediante el modelo teórico del SCBR.

## 4. CONCLUSIONES

Los buses de campo, entre ellos PROFIBUS-DP, son sistemas de comunicación utilizados en el intercambio de información entre los distintos dispositivos que componen un sistema de control basado en red. Se trata de un medio compartido que introduce una serie de fenómenos en los bucles de control. En este trabajo se ha estudiado desde un punto de vista práctico el funcionamiento de los sistemas de control basados en red utilizando PROFIBUS-DP.

Su funcionamiento se ha explicado mediante un modelo teórico que explica los pasos que recorre una señal desde que es capturada en un canal analógico de entrada hasta que es aplicada a la planta mediante un canal analógico de salida, después de ser procesada por el controlador ubicado en el nodo maestro-DP. También han sido objeto de estudio distintas implementaciones reales de controladores discretos en un SCBR real, donde se han observado fenómenos tales como la aparición de retrasos, la pérdida de acciones de control y la prolongación del tiempo de aplicación de las señales de control. Estos fenómenos se deben a la relación existente entre los distintos periodos que condicionan el funcionamiento del sistema completo.

En las aplicaciones desarrolladas se produce una degradación progresiva conforme se va reduciendo la velocidad de transmisión. Esto se debe principalmente al aumento del retraso introducido en el bucle de control y a la pérdida de acciones de control calculadas por el controlador que no llegan a aplicarse debido a las limitaciones del enlace de comunicación. No obstante, la influencia de los distintos retrasos y periodos sobre las prestaciones del bucle de control dependen de la dinámica de la planta, que impone el periodo de control necesario en función de las especificaciones requeridas. En aquellas aplicaciones donde la constante del tiempo de la planta es muy grande en comparación con los valores de los parámetros del SCBR, la influencia del enlace de comunicación puede llegar a ser despreciable.

En el modelo de funcionamiento planteado se ha considerado un tiempo de ciclo-DP constante. Como continuación del presente trabajo de investigación se pretende desarrollar una serie de aplicaciones para estudiar mediante herramientas estadísticas la variabilidad del tiempo de ciclo-DP y ajustar así con más precisión el modelo teórico planteado. Una vez hecho esto, se tiene previsto proponer nuevas estrategias de control aplicables a este tipo de sistemas, utilizando para ello interpoladores, observadores, etc., todo ello desde un punto de vista práctico.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Plan Nacional de I+D+I, en el marco del Programa Nacional de Diseño y Producción Industrial (DPI2003-01964) y del Programa Nacional de Potenciación de Recursos Humanos (BES-2004-5139), cofinanciado por el Fondo Social Europeo.

## REFERENCIAS

- Casanova, V. y Salt, J. (2003). Multirate control implementation for an integrated communication and control system. *Control Engineering Practice*, vol. 11, no. 11, pp. 1335-1348.
- Casanova, V. y Salt, J. (2004). Digital modeling and control with irregular D/A conversion. Proceedings of the 2nd International Conference on Computing, Communication and Control Technologies, Austin, USA, vol. IV, pp. 38-43.
- Casanova, V., Mascarós V. y Salt, J. (2004). Análisis experimental del funcionamiento de un sistema de control basado en red sobre el protocolo Profibus-DP (II). XXV Jornadas de Automática, Ciudad Real (España).
- Cavalieri, S., Monforte, S., Tovar, E. y Vasques, F. (2002). Multi-Master Profibus-DP Modelling and Worst-Case Analysis Based Evaluation. 15th IFAC World Congress on Automatic Control, Barcelona, (Spain).
- ControlNet Specifications (1998), 2<sup>nd</sup> ed. Boca Raton, FL: ControlNet International.
- DeviceNet Specifications (1997), 2<sup>nd</sup> ed. Boca Raton, FL: Open DeviceNet Vendors Association.
- EN50170 (1998). *Profibus specifications. Normative parts of Profibus -FMS, -DP, -PA according to the European Standard*, vol. 2.
- Halevi, Y. y Ray, A. (1988). Integrated communication and control systems: Part I-Analysis. *Journal of Dynamics Systems, Measurement and Control*, vol. 110, pp. 367-373.
- Halevi, Y. y Ray, A. (1990). Performance analysis of integrated communication and control systems networks. *Journal of Dynamics Systems, Measurement and Control*, vol. 112, pp. 365-370.
- Lian, F.L., Moyne, J.R. y Tilbury, D.M. (2001). Performance evaluation of control networks: Ethernet, ControlNet and DeviceNet. *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 21, pp.66-83.
- Liou W. y Ray, A. (1990). Integrated communication and control systems: Part III-non identical sensor and controller sampling. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol. 112, pp. 357-364.
- Mandado, E., Marcos, J., Fernández, C., Armesto, J. y Pérez, S. (2004). *Autómatas programables. Entorno y aplicaciones*. Thompson Paraninfo.
- Mascarós, V., Casanova, V. y Salt, J. (2004). Análisis experimental del funcionamiento de un sistema de control basado en red sobre el protocolo

- Profibus-DP (I). XXV Jornadas de Automática, Ciudad Real (España).
- Monforte, S., Alves, M., Tovar, E. y Vasques, F. (2000). Designing Real-Time Systems Based on Mono Master Profibus-DP Networks. 16th IFAC Workshop on Distributed Computer Control Systems (DCCS'2000), Sydney, (Australia), pp. 36-43.
- Ray, A. y Halevi, Y. (1988). Integrated communication and control systems: Part II - Design considerations. *Journal of Dynamics Systems, Measurement and Control*, vol. **110**, pp. 374-381.
- Salt, J. y Casanova, V. (2004). Digital modeling and control with irregular A/D conversion. Proceedings of the 2nd International Conference on Computing, Communication and Control Technologies, Austin, USA, vol. IV, pp. 62-67.
- Sempere, V., Silvestre, J., Mataix, J. y Fuentes, J. (2000). *Profibus: un bus de campo industrial*. Cuadernos CEA-IFAC.
- Tanenbaum, A.S. (1996). *Computer Networks*, 3<sup>rd</sup> ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall.
- Tovar, E. y Vasques, F. (1999a). From task scheduling in single processor environments to message scheduling in a Profibus fieldbus network. Proceedings of the 7th International Workshop on Parallel and Distributed Real-Time Systems (WPDRTS'99), San Juan, (Puerto Rico).
- Tovar, E. y Vasques, F. (1999b). Cycle properties of the Profibus timed token protocol. *Computer Communications*, vol. **22**, no. 13, pp. 1206-1216, Elsevier Science.
- Weigman, J. y Kilian, G. (2000). *Decentralization with Profibus-DP: Architecture and Fundamentals, Configuration and Use with Simatic S7*. Siemens, Alemania.