

## Sistemas de Control Basados en Red Modelado y Diseño de Estructuras de Control

J. Salt, V. Casanova, A. Cuenca, R. Pizá

*Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática.  
Universidad Politécnica de Valencia. Edificio 5C.  
Camino de Vera s/n 46022 Valencia, España  
e-mail: {julian,vcasanov,acuenca,rpiza}@isa.upv.es*

Resumen: En este trabajo se pretende introducir un tema que últimamente está cobrando un fuerte impulso entre investigadores y usuarios de sistemas de control. Desde los trabajos seminales de Halevi y Ray (1988a,b), el interés por este tipo de sistemas que conjugan las redes teleinformáticas con esquemas de control ha ido creciendo hasta el extremo de que ya es rara la ausencia de trabajos en este ámbito en un gran número de revistas o en los Congresos más importantes, que además suelen contar con sesiones específicas de este tema concreto.

La orientación de este trabajo es la de hacer una amplia introducción del tema, de tal manera que en el ámbito profesional de la Automática se pueda tener una primera toma de contacto, encontrando aquellas referencias más importantes que permitan profundizar en el planteamiento del control en tiempo real de este tipo de instalaciones.

Se ha establecido un conjunto de propuestas de solución desde el punto de vista de la Automática, pero es preciso aclarar que no es el único aunque sí el menos estudiado. Hay alternativas asentadas desde el punto de vista de sistemas teleinformáticos gestionando de forma óptima recursos y/o planificando tareas lo que da lugar a protocolos específicos que mejoran la calidad de servicio y el funcionamiento de este tipo de esquemas. Además se aprovecha la ocasión para apuntar algunas de las soluciones específicas que los autores han considerado ante diferentes alternativas de tratamiento de distintos aspectos de este tipo de sistemas.

De esta forma se apunta a técnicas de control digital con muestreo no-convencional dentro de las que se puede encontrar los sistemas periódicos y multifrecuenciales, como la base de concepción de una serie de opciones de resolución para el modelado y el diseño de sistemas con estas características. Copyright © 2008 CEA.

Palabras Clave: Sistemas de Control Basados en Red. Multifrecuencia. Comunicaciones. Bus de Campo. Retardos. Control por eventos.

### 1. INTRODUCCIÓN

La intención de este trabajo es la de presentar un *tutorial* y una revisión crítica de Sistemas Integrados de Comunicación y Control (SICC) que en diversos ámbitos se suele conocer como “*Networked Based Control Systems*” (NBCS), o simplemente *Networked Control Systems* (NCS). La descripción y análisis se articulan en varias partes de tal manera que el lector pueda ir adentrándose en el ámbito de los Sistemas de Control Basados en Red (SCBR) de manera gradual, siendo posible una consulta carente de orden para quienes ya conocen algunos de los puntos tratados. Se va a comenzar, pues, por describir el problema general de un bucle de control que debe asumir un medio compartido para la transmisión de señales digitales, aprovechando para apuntar ya algunas cuestiones que van a resultar de importancia para su posterior consideración.

Cuando se plantea un proyecto de control de un sistema que incorpora una red local para la transmisión de señales, se pueden dar varios tipos de aplicaciones (Kim *et al*, 2006): teleoperación, control supervisor y control sobre la red (NBCS). En general esta red va a aportar una considerable disminución de

cableado y por consiguiente una mayor flexibilidad de mantenimiento, una mejora de la versatilidad y una disminución del coste de la aplicación (Yang, 2006). Así pues, motivos de volumen restringido de la instalación (aviónica, manufactura de coches), de distribución espacial, cubriéndose distancias en ocasiones de magnitud considerable (plantas químicas) o simplemente una optimización de costes, mantenimiento y funcionamiento, pueden aconsejar o requerir este tipo de soluciones (Halevi and Ray, 1988a,b).

Como ya se ha adelantado, este trabajo se va a centrar en una propuesta original para el caso en el que la transmisión de señales dentro de cualquier bucle de control del sistema global deba atravesar un recurso compartido por todos ellos, además de ser utilizado por otros dispositivos del sistema con diversas finalidades. Esta transmisión se realizará entre un emisor y un receptor (habitualmente sensor-controlador, controlador-actuador, aunque en ocasiones tan sólo se asume la red en la adquisición de datos dejando la inyección de control con un cableado dedicado). Hay dos tipos de redes que pueden ser objetivo de este tipo de proyectos: redes de propósito general (Ethernet, RS-232, aplicaciones con Internet), o específicas de

medios industriales (DeviceNet, CAN, Foundation Fieldbus, Profibus, etc). En las primeras se pueden transmitir tramas de mayor magnitud con menores requerimientos temporales, mientras que en las segundas se consideran restricciones temporales aunque los paquetes son de menor número de bytes (Goodwin *et al*, 2006). Nuestro trabajo se centrará en las segundas que pueden presentar diversas políticas de planificación o gestión de los mensajes: determinista en un orden determinado, como el “pooling” o encuesta de PROFIBUS, o acceso aleatorio como el de CAN resuelto con prioridades. Habitualmente se habla de que éste es el protocolo propio de la red o nivel inferior, y el segundo, nivel de planificación o política de control (Goodwin *et al*, 2006) que decide cómo enviar los datos a través de la red, distinguiéndose en este caso políticas (estática como el pooling o dinámicas –MEF (Walsh and Ye, 2001), primero el error máximo (*maximum error first*) ó TOD (Walsh and Ye, 2001; Walsh *et al*, 2002a), *try once discard*).

En todos los casos, los problemas fundamentales planteados en un SCBR son (Yang, 2006; Goodwin *et al*, 2006; Hespanha, *et al* 2007, Casanova *et al*, 2006, Tipsuwan and Chow, 2003):

- La pérdida de datos (*packet dropping*) bien porque no llegan o bien porque llegan demasiado tarde para ser utilizados en el control. Este último caso sería la pérdida inducida.
- Los retrasos temporales de las tramas. Hay de diversos tipos. El de cómputo, el de propagación y el de espera frente al cual los anteriores suelen ser despreciables. Estos tiempos de espera vienen motivados por el tiempo que los paquetes deben esperar a ser recogidos y enviados por el recurso compartido y que en función de la red estudiada pueden ser función de varios factores. En función del modelo que se asuma de la red, se les puede conocer por retardos inducidos (Wittenmark *et al*, 1998) y son de naturaleza distribuida y discreta. Luego volveremos a este importante punto en nuestro caso concreto.
- El ancho de banda que el recurso compartido puede dedicar a la transmisión de la información. Puede haber diversos factores que lo determine aunque el principal suele ser el número de elementos que pugnan por su uso en una cierta instalación en un determinado momento (carga de red) y el tipo de funcionamiento de ese medio.
- El desfase o falta de sincronismo de diversos relojes en distintos puntos de la red. Es de sobra conocido la dificultad de consecución de ese sincronismo así como de la variedad de métodos y estrategias a seguir en campos en los que también resulta un tema importante.
- La llamada capacidad del canal de transmisión debida a la naturaleza digital de las redes prácticas que manejan tamaños finitos de palabras por lo que todos los datos deben sufrir un proceso de cuantificación.

Cuando se plantea una aplicación de control en un esquema NBCS se pueden considerar dos perspectivas: Control Directo (*Direct Control*) o Control Jerárquico (*Hierarchical Control*) (Tipsuwan and Chow, 2003). En la primera, el controlador se implementa únicamente en la parte remota o servidor, mientras que en la segunda se puede considerar un controlador remoto y uno local junto al proceso. En ambas partes se pueden considerar además, u opcionalmente al controlador, capacidades de inferencia o cálculo (tablas preprogramadas -*look up tables*-, procedimientos borrosos), (Tipsuwan and Chow, 2002b,2003,2004a; Lee *et al*, 2006, Chow and Tipsuwan, 2003; Ray, 1989) siendo especialmente interesantes los contextos de

“middleware” (Tipsuwan and Chow, 2004a) normalmente en el servidor, o de accionadores inteligentes (*smart actuator*) implementados en el cliente (al lado de la planta a controlar) (Lee *et al*, 2001). Cada una presenta sus ventajas e inconvenientes. En cualquier contexto de control además de los problemas introducidos de posibles errores de transmisión, longitud de los paquetes y capacidad del canal de transmisión, retardos y carga de red, hay un punto adicional importante: el *skew* o desfase entre los muestreadores de las partes remota y local. Se trata de un tema especialmente importante en función del tipo de control que se proyecte y que desemboca en la consideración de políticas de actuación guiadas por tiempos o por eventos (*time-driven* o *event-driven*) en las diferentes partes del bucle de control cuando se requiere la sincronización de dispositivos en las diferentes partes (Johannessen, 2004; Poply *et al*, 2004).

Antes de proseguir con un análisis exhaustivo del funcionamiento de un control basado en red, teniendo en mente la forma en la que operan las redes locales industriales más difundidas y usadas, se incluirá un resumen de los principales autores y grupos cuya actividad se ha centrado en este campo específico. En este punto se aprovechará para incluir una serie de comentarios en aras a introducir diversos problemas y tendencias asociados a estos esquemas. Posteriormente se pasará a una descripción detallada del modo de operación de las instalaciones más comunes en el ámbito industrial incidiendo sobre el conjunto de situaciones y parámetros que van a provocar un mayor efecto sobre el bucle de control. Finalmente se presentará un resumen de diversas alternativas de afrontar el diseño práctico de control considerando y exponiendo qué tipo de simplificaciones se suelen asumir, para acabar introduciendo soluciones particulares introducidas por los autores.

## 2. REVISIÓN DEL ESTADO ACTUAL DEL TEMA

Las primeras referencias acerca de la problemática asociada a los SCBR aparecen en una serie de artículos publicados a partir de 1988, por el Dr. Asok Ray y colaboradores, de la Pennsylvania State University (EEUU). Estos artículos (Halevi and Ray, 1988a,b; Ray, 1989; Liou and Ray, 1991c), tuvieron su origen en el trabajo del grupo en sistemas de control de aeronaves, en los cuales las limitaciones de espacio y peso imponen la utilización de enlaces compartidos. En ellos se describe el problema del SCBR (que en esta serie de artículos aparece referido como Sistema Integrado de Comunicación y Control), que plantea un modelo discreto y variante con el tiempo del mismo y se establecen las condiciones para garantizar la estabilidad del sistema. También se plantea la posibilidad de emplear diferentes frecuencias de muestreo en controlador y planta, lo cual lleva a la consideración de una estructura de control multifrecuencia que si bien en ese trabajo se presenta de forma poco desarrollada, demuestra su potencial para la resolución de los problemas inherentes a este tipo de esquemas. Una segunda serie de artículos (Halevi and Ray, 1990; Liou and Ray, 1990, 1991a,b; Luck and Ray, 1990,1994, Ray, 1994) abordan el problema desde un punto de vista estocástico. Se realiza un análisis estadístico de los retrasos inducidos por el SCBR y se desarrolla una ley de control óptima, adaptada al problema. A pesar de que la línea de investigación del grupo ha derivado hacia temas menos relacionados con este tipo de problemas, no cabe duda de que sus artículos constituyen un magnífico punto de partida para comenzar en el campo de los SCBR.

Un segundo grupo de investigación que ha publicado

interesantes trabajos (Wittenmark *et al*, 1995,1998, Törngren, 1995,1998; Nilsson, 1998) sobre el tema es el liderado por el Dr. Björn Wittenmark en el Lund Institute of Technology (Suecia). En estos trabajos se describen y analizan los problemas temporales (retrasos y falta de sincronismo) que aparecen en los SCBR, desde un punto de vista fundamentalmente estocástico. Se proponen soluciones al problema empleando controladores óptimos y asumiendo que el algoritmo de control dispone de información referente al instante de tiempo en el que se generó la información. Son destacables la descripción exhaustiva de los parámetros significativos en un SCBR, considerando la posibilidad de sistemas basados en tiempos y sistemas basados en eventos, así como los datos experimentales obtenidos a partir de buses de campo reales.

Las contribuciones del grupo de investigadores liderado por el Dr. Peter H. Bauer en la University of Miami (EEUU) y el Dr. Kamal Premaratne en la University of Notre Dame (EEUU), (1998, 1999, 2001a,b,c), (Lorand *et al*, 2000), (Sichitiu *et al* 2001) se han centrado en el estudio de los SCBR con retrasos variables pero conocidos, considerando el caso de retrasos arbitrariamente grandes. Exponen el desarrollo de condiciones de estabilidad y proponen estructuras de control basadas en múltiples reguladores distribuidos en la red compensando la influencia de los retrasos de acceso.

El grupo de investigación encabezado por el Dr. Gregory C. Walsh de la University of Maryland (EEUU), y la Dra. Linda G. Bushnell de la University of Washington (EEUU) (2001), ha presentado trabajos conjuntos (Beldiman & Walsh, 2000; Beldiman *et al*, 2001; Walsh *et al* 2001 2002a,b) que utilizan la teoría no lineal y la presencia de perturbaciones para modelar la influencia del enlace compartido, aplicada a los SCBR con retrasos periódicos y aleatorios. En sus modelos se asume la posibilidad de asignar diferentes prioridades a la transmisión de información. Proponen predictores para estimar la salida de la planta mientras la comunicación no es posible, determinando las condiciones que se deben cumplir para garantizar la estabilidad, con la intención de diseñar el controlador sin tomar en cuenta la presencia del enlace compartido. Para ello desarrollan sus propios métodos de planificación dinámica del uso del enlace compartido, basados en la asignación de prioridades en función de la diferencia entre dos informaciones recibidas de forma consecutiva, en los que se han dado en llamar algoritmos de codificación del error.

Cuenta con un buen número de artículos publicados, referentes a los SCBR (Lian *et al*, 2000, 2001a,b,c, 2002a,b, 2003), Yook *et al*, 2001, 2002; Otanez *et al*, 2002a,b; Moyne and Tilbury, 2007), el grupo coordinado por el Dr. James R. Moyne y la Dra. Dawn M. Tilbury, de la University of Michigan (EEUU). En estos trabajos se realiza un detallado análisis de los retrasos que aparecen en algunas redes empleadas como medio de comunicación en los sistemas de control (Ethernet, ControlNet y DeviceNet), evaluando sus prestaciones. Para ello establecen una serie de parámetros temporales que caracterizan la red y determinan sus valores de forma experimental. Proponen modelos multivariantes para el SCBR y criterios para la selección del periodo de muestreo, teniendo en cuenta que, a diferencia de lo que sucede en un bucle de control convencional, el aumento de la frecuencia de muestreo acabará degradando las prestaciones debido a la sobrecarga de información en el enlace compartido. El marco matemático establecido en estos trabajos permite al diseñador del sistema de control analizar la influencia de los retrasos temporales en las prestaciones. En sus trabajos más recientes se emplean estimadores para determinar la información perdida a causa del enlace compartido, sustituyendo

de esta forma el ancho de banda por computación. Se analiza la estabilidad de la solución propuesta verificando los resultados mediante simulación y de forma experimental. A partir de los resultados obtenidos demuestran cómo en un SCBR, a diferencia de en un sistema de control discreto convencional, reducir el periodo de muestreo no siempre mejora las prestaciones ya que al hacerlo aumenta el volumen de información utilizando el enlace compartido, haciendo aumentar el retraso.

Otro grupo de investigación que recientemente ha aportado importantes publicaciones a la línea de investigación que es objeto de estudio en este trabajo es el representado por el Dr. Michael S. Branicky de la Case Western Reserve University (EEUU). Las primeras referencias estudian los sistemas híbridos de los cuales, los SCBR son un caso particular. Sin embargo, sus trabajos más recientes (Banicky, 1997; Branicky *et al*, 1998, 2000, 2002, 2003; Zhang and Branicky 2001; Zhang *et al* 2001) se orientan específicamente a los SCBR. Empleando técnicas de análisis de la estabilidad de sistemas híbridos, se estudia la influencia de la frecuencia de muestreo y del retraso impuesto por el medio compartido. Para ello proponen una representación gráfica de la región de estabilidad del SCBR. En su planteamiento se emplean sensores que operan basados en temporización, mientras que los controladores y actuadores operan por eventos, de forma que el periodo de actuación no puede considerarse como constante. Se derivan condiciones suficientes que, impuestas sobre el periodo de transmisión, garantizan la estabilidad del SCBR. Los trabajos más recientes de este grupo se centran en la técnica de co-diseño que propone considerar conjuntamente el diseño del control y la planificación del medio compartido. En el enfoque tradicional se consideran por separado los aspectos relacionados con la planificación (ancho de banda, fiabilidad, cuantificación,...) y aquellos que son propios del control (estabilidad, precisión, tolerancia a fallos,...). Sin embargo, la influencia entre ambos aspectos es real y debería ser tenida en cuenta. Además el Dr. Branicky se encarga de mantener actualizada una página en Internet (*Networked Control Systems Repository*, cuya dirección es <http://home.cwru.edu/ncs/index.htm>) que constituye un verdadera base de datos (grupos de investigación, publicaciones, conferencias,...) de la línea de investigación.

De forma más reciente, el grupo de investigación liderado por el Dr. Mo-Yuen Chow, en la North Carolina State University ha aportado algunas contribuciones interesantes al problema de los SCBR (Tipsuwan and Chow, 2001, 2002a,b, 2003, 2004a,b,c; Chow and Tipsuwan 2001a,b, 2003; Chow, 2003; Almutari *et al*, 2001; Almutari & Chow 2002, 2003). Este grupo aporta una detallada revisión de los SCBR y la problemática asociada, su ámbito de aplicación, los parámetros que los caracterizan, así como de las distintas técnicas de control que han sido aplicadas con la intención de resolver el problema, tanto desde el punto de vista del diseño del controlador como desde la planificación del acceso al medio de comunicación compartido. Además de esta revisión general del estado del arte, proponen estructuras de control para compensar la influencia de los retrasos asociados al enlace, basadas en la lógica borrosa. Para ello emplean un regulador PI cuyos parámetros son ajustados externamente a partir de funciones de pertenencia basadas en el error percibido por el controlador. Otra técnica propuesta por este grupo, denominada metodología de adaptación del control por usuario final, se basa en adaptar las ganancias del controlador a partir del volumen de tráfico o de la calidad del servicio durante el funcionamiento del sistema. Se asume para ello que los emisores de información del bucle de control son capaces de medir las condiciones de tráfico en la red. El concepto calidad del servicio

(habitualmente denotado QoS) se ha utilizado con frecuencia en ingeniería de las comunicaciones para referirse a la productividad punto a punto (esto es, la cantidad de unidades de información transmitidas por unidad de tiempo) y a la cota superior de retraso entre emisión y recepción. El controlador, como usuario final del enlace, solicita una determinada QoS y, si sus exigencias no pueden ser satisfechas, el controlador adaptará sus parámetros para tratar de conseguir las mejores prestaciones. En sus últimas contribuciones utilizan el concepto de "middleware", que se refiere a la implementación de aplicaciones enlazadas y compartiendo recursos a través de una red, para colaborar en el esfuerzo de control. La metodología que proponen modifica la acción de control generada por el controlador en función de las condiciones de tráfico de información observadas, lo cual supone una adaptación de la ley de control a las condiciones de utilización del medio compartido. Una línea que también cabe considerar es la queda dedicada a control predictivo basado en modelos como otra forma de soslayar un incremento de tráfico de la red en este tipo de esquemas (MB-NCS de *model based networked control systems*). El uso del conocimiento del modelo dinámico de la planta en instantes en los que no se establece comunicación entre emisor y receptor permite, pues, la reducción de la frecuencia del tráfico de datos. Los profesores Montestruque y Antsaklis han publicado varios trabajos en este campo centrándose en las condiciones de estabilidad de estas estructuras asumiendo realimentación del estado o de la salida y retardos de red de diversa distribución tanto para casos de consideración del modelo entre instantes regulares y constantes de tiempo (Montestruque y Antsaklis, 2003a), como para el caso de intervalos de duración irregular (Montestruque, Antsaklis, 2003b, 2004).

A nivel nacional y en la medida del conocimiento de los autores, cabe destacar la actividad de los grupos de trabajo de la profesora Margarita Marcos en la Universidad del País Vasco centrado en aplicaciones industriales con buses de campo y problemas asociados en tiempo real (Calvo et al, 2006), así como en el establecimiento de metodologías y diseño de herramientas de soporte al desarrollo de sistemas distribuidos de control industrial (Estevez et al, 2007), y del profesor Josep María Fuertes de la Universidad de Catalunya quien junto a su equipo trabaja en una línea muy semejante a la que se desarrolla en esta contribución aunque tal vez más centrada en el estudio de sucesión de tiempos de muestras y por consiguiente en aspectos de planificación que permitan mejorar el comportamiento del SCBR (Martí et al, 2004). Cabe destacar sus resultados en el análisis de la estabilidad de instalaciones de este tipo (Velasco et al, 2005). Recientemente el equipo formado por los profesores Alfonso Baños y Antonio Barreiro (2007) de las Universidades de Murcia y Vigo respectivamente, están trabajando en el control robusto de sistemas de teleoperación con retardos (García-Rivera y Barreiro, 2007), al igual que el profesor Antonio Sala (2005, 2007) de la Universidad Politécnica de Valencia con resultados en la misma línea de investigación aplicados a SCBR. Actualmente, el profesor Fuertes es chair del Comité Técnico "Network-based Control Systems and Applications" de la IEEE Industrial Society, manteniendo la página web:

<http://iml.cpe.ku.ac.th/ies/>,

que tiende a ser un referente para la investigación en este ámbito. En cuanto a los antecedentes y resultados previos alcanzados por los autores en los últimos años con relación a este tipo de esquemas, cabe señalar que la actividad se ha centrado en un análisis pormenorizado del funcionamiento de instalaciones basadas en el bus de campo Profibus-DP introduciendo modelos

de simulación que permitan diversos ensayos fuera de línea. También se ha trabajado en el diseño de controladores apropiados a estos entornos desde distintas perspectivas, presentando la novedad de reguladores con estructura no-convencional y siempre desde la óptica de técnicas de control multifrecuenciales. (Casanova et al, 2006a,b, 2007; Casanova y Salt, 2000, 2002, 2003, 2004; Vélez y Salt 2000, 2004; Salt y Casanova 2000, 2004; Salt y Cuenca 2002, Salt y Albertos 2005; Salt et al, 2006a,b; Cuenca et al, 2007). Posteriormente se presentará un resumen de esta clase de contribuciones.

### 3. DESCRIPCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL PROBLEMA GENERAL Y ORIENTACIÓN A UNA SOLUCIÓN DE CONTROL

Un bucle típico de control digital directo suele estar compuesto básicamente por un controlador digital y una planta continua. La comunicación entre ambos no sufre ninguna limitación más allá de la necesidad de dispositivos convertidores A/D y D/A que permitan la transición de señales entre el mundo analógico y los instrumentos digitales (figura 1).

La frecuencia de muestreo que rige en los convertidores y el regulador discreto suele ser la misma y queda descrita por un periodo de muestreo básico que se denotará por  $T$ . Este periodo, si es posible, se elige de magnitud suficientemente pequeña de tal manera que se sigan verificando las especificaciones de diseño ya que el conjunto habitualmente ha migrado desde un control continuo hacia la introducción de un dispositivo digital en la etapa de control. Ahora bien, en el caso de un SCBR, la comunicación entre regulador y planta queda sujeta a restricciones debidas a la existencia de un medio compartido. En el caso de que el ancho de banda de este medio no permita esa transmisión al periodo ideal  $T$ , lógicamente existirá una inevitable pérdida de información; esto es, no todos los muestreos/acciones de control podrán ser enviados desde el convertidor AD/controlador al controlador/ convertidor DA y por tanto el sistema de control perderá las prestaciones pudiendo incluso llegar a ser inoperante. Para considerar el caso más general, en la figura 2 se plantea la posibilidad de que los dispositivos del bucle de control (sensor, actuador y controlador) operen con diferentes periodos de muestreo ( $T_s$ ,  $T_A$  y  $T_C$ ). Un

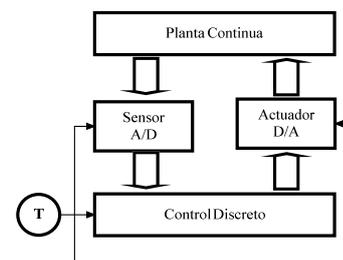


Figura 1. Sistema de control discreto convencional.

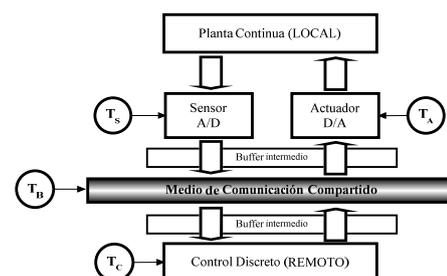


Figura 2.- Sistema de Control Basado en Red.

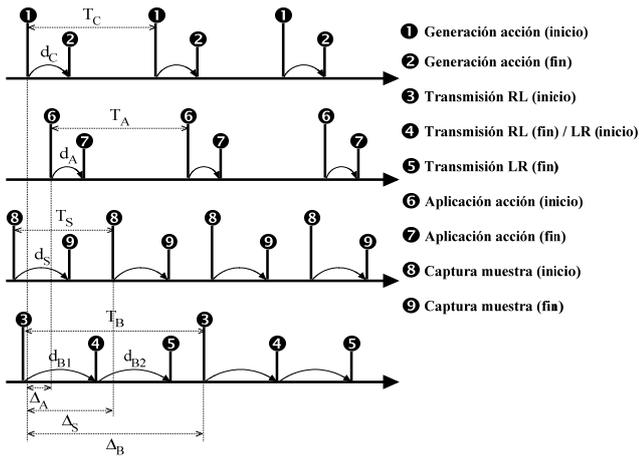


Figura 3. Modelo de funcionamiento de un SCBR.

cuarto periodo ( $T_B$ ) está relacionado con la frecuencia de las señales transmitidas por el medio de comunicación compartido. Antes de plantear un modelo conceptual orientado al control de este tipo de estructuras será oportuno tener una descripción acerca de cómo puede funcionar un sistema de este tipo. Como ya queda claro en la figura 2, se puede considerar que las muestras adquiridas son depositadas en un almacén antes de que la política de arbitraje del medio compartido (bus de campo, red local) recoja la última y la transmita al lado remoto en el que habitualmente reside el controlador discreto que una vez ha calculado la acción de control la deposita en el almacén o buffer intermedio de la transmisión remoto-local. Evidentemente, un cronograma que puede modelar este comportamiento sería el mostrado en la figura 3.

En esta figura, además, se representan los tiempos de conversión del dispositivo de toma de muestras,  $d_S$ , del cómputo de control  $d_C$ , así como del accionador  $d_A$ . Se ha considerado que los tiempos que tardan las muestras en atravesar la red son diferentes en los enlace remoto-local y local-remoto,  $d_{B1}$  y  $d_{B2}$ , y que en general los periodos de las secuencias discretas de muestreo  $T_S$ , de control  $T_C$ , de actuación  $T_A$  y de comunicación  $T_B$  pueden ser distintos. Además y con el fin de ser realistas se ha considerado la posible presencia de desfases (en inglés “skews”) entre los relojes de accionador, sensor, y comunicación, considerando como base de tiempos de referencia el reloj ubicado en el lado del controlador. Los parámetros que definen dichos desfases son respetivamente  $\Delta_A$ ,  $\Delta_S$  y  $\Delta_B$ . Las marcas que etiquetan los instantes de tiempo en el cronograma de la figura 3 deben ser interpretadas como se indica a continuación:

- Instantes 1 y 2: Inicio y final de la generación de una nueva acción de control.
- Instantes 3 y 4: Inicio y final de la comunicación control-actuador (enlace remoto-local).
- Instantes 6 y 7: Inicio y final de la aplicación de una nueva acción de control.
- Instantes 8 y 9: Inicio y final de la captura de una nueva muestra de la variable de interés.

Cuando se pretenda disponer una política de control para este tipo de situaciones, se debe tener en cuenta las magnitudes de las diversas latencias y periodos con una holgura suficiente para que una aplicación en tiempo real pueda funcionar sin quedar supeditada a avatares que no queden considerados. Además no sería completa la descripción si no se avanzase un paso más y quedase expuesto claramente el mecanismo de un enlace desde que se genera la muestra en el emisor hasta que es efectivamente

utilizada en el receptor; inicialmente se pueden distinguir dos situaciones que respondan a la existencia o no de desfase entre las bases de tiempo de generación y utilización. La figura 4 intenta explicar este conjunto de posibilidades. La relación entre el desfase emisor-receptor y el retraso de acceso determina el retraso percibido por el receptor (antigüedad de la información). Se pueden dar dos situaciones: si el desfase es mayor que el retraso de acceso, el retraso percibido es igual al desfase mientras que si el desfase es menor que el retraso de acceso el retraso percibido por el receptor será igual al desfase más el periodo de muestreo. En la transición entre estas situaciones de antigüedad mínima y máxima suceden los fenómenos de muestreo vacante y rechazo de muestra que, en definitiva suponen pérdidas y reutilizaciones de información. La tabla 1 resume las diferentes posibilidades representadas en la figura 4.

Tabla 1. Casos relativos a la relación entre desfase y retraso.

Retraso menor que desfase	Antigüedad mínima: D
Transición mínima-máxima	Muestreo vacante
Retraso mayor que desfase	Antigüedad máxima: T+D
Transición máxima- mínima	Rechazo de muestra

Tras esta caracterización del funcionamiento de enlaces emisor-receptor, la solución de control propuesta debe ser tal que intente simplificar la multitud de complejas situaciones que se pueden dar, por lo que desde esa intención se ha presentado una cierta opción sencilla de control de este tipo de sistemas. Cuando se intente abordar este problema, se debería también tener en cuenta distintas posibilidades de política de tratamiento de muestras, esto es guiadas por tiempos o por eventos (*time-driven* o *event-driven*) ya que ello puede redundar de nuevo en facilitar o complicar el planteamiento del problema. De manera general se puede decir que ante casos de retardos fraccionarios respecto a un periodo de muestreo, una política de tiempos enrasa el retardo al siguiente múltiplo entero de periodos de muestreo con el consiguiente determinismo del problema aunque tal vez aumentando innecesariamente dicha magnitud; por el contrario la política guiada por eventos toma el retraso tal cual es, aunque requerirá mayor complejidad del modelo y consiguientemente del controlador a considerar.

La figura 5 muestra la solución que se ha considerado y que desde el punto de vista del control puede sumarse a otro tipo de soluciones del tipo de inferencia de muestras, sistemas con retardos o sistemas con pérdidas de muestras. Se trata de una conceptualización que tiende a diferenciarse de las clásicas soluciones en comunicaciones y redes de campo y que queda basada en la teoría de sistemas con muestreo no-convencional. El SCBR se ha considerado dividido en dos partes: la local al lado de la planta y la remota que sólo puede tener contacto con local atravesando el medio compartido. En algunos casos se suele considerar la notación opuesta considerando el lado local el que implementa el control; asimismo se le suele llamar servidor al lado alejado a la planta y esclavo a donde se encuentra ubicada los dispositivos en contacto directo con ella.

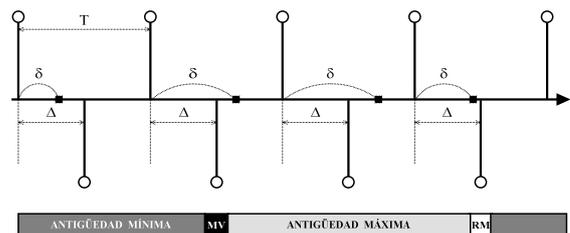


Figura 4. Relación desfase-retraso percibido.

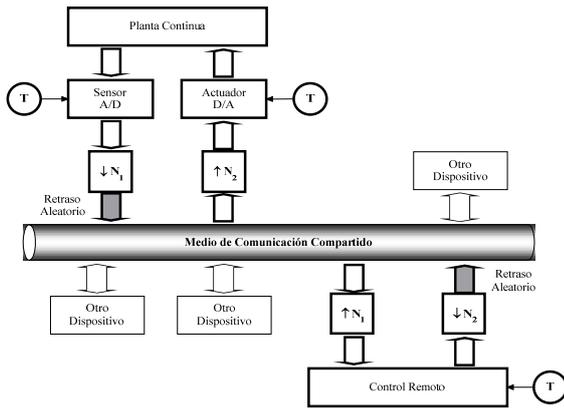


Figura 5. Sistema de Control Basado en Red.

En cualquier lazo cerrado en un SCBR suelen haber dos emisores: el sensor local y el control remoto. Tal y como se ha expuesto, en ambos casos la frecuencia de las señales que de ellos emanen queda restringida por la presencia del medio compartido por lo que se han considerado bloques llamados  $\downarrow N$  and  $\uparrow N$  que pretenden significar operaciones de disminución de frecuencia de muestreo (*downsampling*) y de aumento de la misma (*upsampling*) requeridas en la transmisión y recepción en virtud del ancho de banda limitado del medio de transmisión. El escenario más general exige la consideración de anchos de banda distintos en los sentidos planta-controlador y controlador-planta ya que si bien es cierto que el medio físico suele ser el mismo, ambos enlaces pueden tener diferentes características de funcionamiento. Así pues, se puede fijar que el primero pueda transmitir una acción cada  $T_1$  unidades de tiempo, mientras que el segundo pueda hacerlo con una muestra por periodo de  $T_2$ . Tal y como se ha fijado el razonamiento, se debe verificar que:

$$T_1 \geq T \quad \text{y} \quad T_2 \geq T$$

Cuanto mayores sean  $T_1$  y  $T_2$ , comparados con  $T$ , indicará una mayor limitación impuesta por el medio de transmisión y aparecerá una degradación mayor del control. Además no resulta restrictivo considerar relaciones enteras de estos periodos con relación al que se le llamó periodo ideal o básico  $T$ .

$$T_1 = N_1 \cdot T \quad \text{y} \quad T_2 = N_2 \cdot T$$

El significado de estos parámetros es fijar la tasa de transmisión que permite el ancho de banda del medio compartido; sólo una de cada  $N_1$  acciones de control y sólo uno de cada  $N_2$  muestreos serán transmitidos con seguridad. Lógicamente a menor ancho de banda,  $N_1$  y  $N_2$  serán mayores. Aparece claro que intervienen hasta tres frecuencias distintas en el planteamiento del control, por lo que con esta conceptualización no parece descabellado el uso de técnicas de control multifrecuencial.

Tal y como se ha dicho antes, se podría plantear un control convencional con sólo una frecuencia de muestreo que conduciría a un periodo elevado y con ello a una pérdida de prestaciones que puede considerarse como el caso peor de control. Entre éste y el ideal es el que se desea fijar aproximándose todo lo posible al mejor caso. El siguiente epígrafe se presenta en aras a la modelización que prepare una correcta preparación de la orientación realizada.

### 3.1 Modelado periódico del SCBR

Como se ha expuesto en el epígrafe anterior, el hecho de considerar diferentes frecuencias de muestreo en diferentes partes del bucle de control en red nos va a llevar a la introducción de técnicas multifrecuenciales para dar respuesta adecuada a esta forma de plantear este tipo de situaciones.

Efectivamente, mediante el recorte (“*skip*”) del número de muestras en los envíos emisor-receptor, se puede dar un modelo de concepción del problema asumiendo una reducción de la carga de la red; posteriormente sería necesaria una reconstrucción de señales que puede ser una simple expansión de la frecuencia. Es por ello que es evidente que se van a utilizar técnicas propias de los sistemas multifrecuenciales de tal manera que se eviten problemas de importante pérdida de prestaciones o incluso de aparición de inestabilidad (Hespanha *et al*, 2007; Zhang *et al*, 2001b).

Una vez planteado el problema, el objetivo es plantear alternativas de control basadas en la conceptualización planteada para este tipo de entornos. Para ello un primer objetivo puede ser establecer un modelo de la planta a controlar que incluya el enlace tal y como se ve desde la perspectiva del controlador.

Se denota por  $G_p(s)$  a la función de transferencia de la planta continua lineal e invariante con el tiempo. El modelo de esta planta tal y como es vista desde la perspectiva de un regulador discreto convencional en un entorno con un enlace exclusivo ideal y con conversiones A/D y D/A convencionales se suele describir como la función equivalente discreta,  $G_p(z)$ :

$$G_p(s) = \frac{Y(s)}{U(s)}$$

$$G_p(z) = \frac{\mathcal{Z} \{U(s) \cdot G_p(s)\}}{\mathcal{Z} \{U(s)\}} \Bigg|_{U(s)=\frac{1}{s}} = (1-z^{-1}) \mathcal{Z} \left\{ \frac{G_p(s)}{s} \right\} = \frac{Y(z)}{U(z)} \quad (1)$$

De forma más cercana a la práctica real se puede considerar una serie de periodos de retardo que identifiquen los retardos que puedan resultar insalvables en procesos de comunicación y conversiones de acuerdo a una política de guiado por tiempos sincronizados que impida la asunción de retardos fraccionales.

$$Y(z) = U(z) \cdot G_p(z) \cdot z^{-2} \quad (2)$$

La expresión previa muestra la relación entre la secuencia de acciones de control generadas por el controlador,  $U(z)$  y la secuencia de muestreos recibida por este dispositivo,  $Y(z)$  cuando no existe limitación de ancho de banda de transmisión. En el caso de un SCBR, las operaciones de recorte (*skip*) y expansión (*expand*) de muestras (Coffey and Williams, 1966; Gopinath and Burns, 1994; Khargonekar *et al*, 1985)), pueden ayudar a asumir el modelado de las limitaciones respecto a la cantidad de muestras transmitidas.

El operador *skip* conlleva una reducción de frecuencia que elimina  $N-1$  muestras de cada grupo de  $N$  consecutivas. Por otra parte, *expand* acarrea un aumento de frecuencia mediante la inclusión de  $N-1$  muestras nulas entre cada pareja de muestras originales. En la figura 6, se puede observar una interpretación gráfica, mientras que matemáticamente se puede expresar:

$$Y(z_N) = \text{Skp} \{Y(z)\}_N = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} Y(e^{j2\pi k/N} \cdot z^{1/N}) \quad (3)$$

$$Y(z) = \text{Exd} \{Y(z_N)\}_N = Y(z^N) \quad (4)$$

En las expresiones anteriores la variable  $z$  queda referida a un periodo  $T$  y  $z^N$  a un periodo  $NT$ .

Cuando existen limitaciones en el ancho de banda de uno o ambos enlaces, la relación entre las acciones de control generadas y las muestras recibidas puede entenderse como un sistema periódico. Si la planta tiene un comportamiento lineal, esta relación mantendrá esta característica pero no será invariante con el tiempo, por lo que no podrá ser modelada como un sistema LTI mediante el uso de una cierta función de transferencia convencional.

La expresión matemática que modela el comportamiento periódico del bucle, tal y como es percibida desde el punto de vista del controlador es la siguiente:

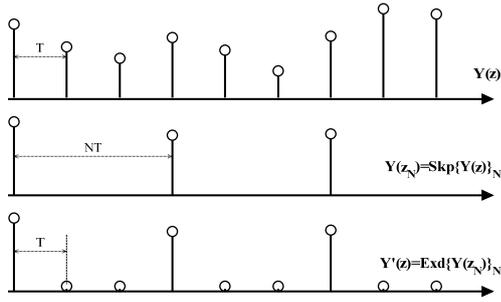


Figura 6. Operaciones skip y expand.

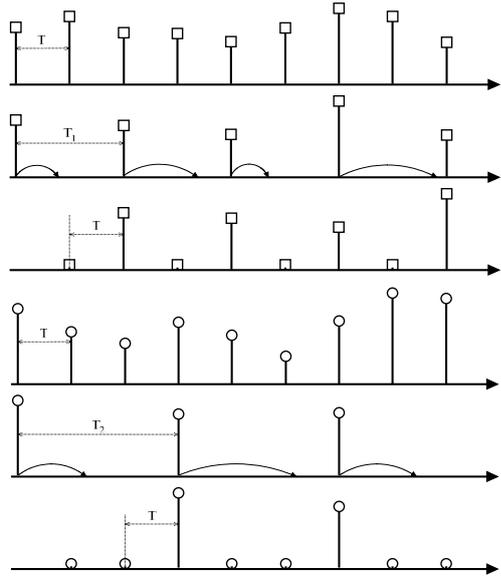


Figura 7. Pasos en la obtención del modelo periódico.

$$Y(z) = Exd \left\{ Skp \left\{ Exd \left\{ Skp \left\{ U(z) \right\}_{N_1} \cdot z_1^{-1} \right\}_{N_1} \cdot G_p(z) \right\}_{N_2} \cdot z_2^{-1} \right\}_{N_2} \quad (5)$$

La expresión anterior representa la relación periódica que existe entre la secuencia de acciones de control generada por el controlador y la secuencia de muestras recibida por el mismo. El máximo común múltiplo de las multiplicidades de ambos enlaces determina la periodicidad del modelo. La figura 7 reproduce los pasos de esta expresión. En la parte superior de la figura se representa la pérdida de acciones de control (determinada por la relación de multiplicidad  $N_1$ ) y en la parte inferior, la pérdida de muestras de la variable de interés (determinada por la relación de multiplicidad del enlace entre la planta y el controlador remoto  $N_2$ ).

Nótese que en este modelo periódico las variables  $z_1$  and  $z_2$  se usan para denotar los periodos de muestreo tras las reducciones de frecuencias por el medio compartido. Así,  $z_1^{-1}$  y  $z_2^{-1}$  significan retrasos de  $T_1$  y  $T_2$  unidades de tiempo respectivamente. Como ya se ha dicho, la relación anterior es  $N$ -periódica siendo  $N = m.c.m. \{N_1, N_2\}$  pero no representa a un sistema invariante en el tiempo.

Así pues, el lazo es percibido desde el punto de vista del controlador como un sistema periódico. A partir de aquí y a la hora de plantear el control, se pueden seguir diferentes caminos; una posibilidad es la consideración de una estructura de control periódico y, otra que en principio puede resultar más asequible, es obtener un modelo LTI e implantar un regulador diseñado de acuerdo a técnicas convencionales de diseño toda vez que el problema que se hereda es el rediseño de una bucle de control

que funcionaba correctamente cuando se introduce el uso de un medio compartido.

El modelo periódico puede ser convertido en un LTI usando la conocida técnica de estiramiento (*lifting*) basada en disponer de la sucesión de muestras de las señales de entrada y salida en el período de validez el modelo periódico como las entradas y salidas de un modelo multivariable, de ahí el nombre de estiramiento (Khargonekar *et al.*, 1985; Francis and Georgiou, 1988; Bamieh *et al.*, 1991)). En el caso de equiespaciamento de las muestras de entrada y salida –como sucede en este caso– un sistema SISO  $N$ -periódico conduce a un sistema MIMO  $N \times N$  LTI. Aplicando las propiedades de los operadores *skip* y *expand* el modelo multivariable LTI del lazo incluyendo el comportamiento dinámico de la planta y la influencia del medio compartido vendrá dado por la siguiente expresión:

$$\left[ \frac{Skp \left\{ z^{-1} \cdot Exd \left\{ Skp \left\{ \tilde{U}_j(z) \cdot G_p(z) \right\}_{N_2} \cdot z_2^{-1} \right\}_{N_2} \right\}_{N_1}}{U_j(z_N)} \right]_{j=1,2,\dots,N} \quad (6)$$

donde  $\tilde{U}_j(z) = Exd \left\{ Skp \left\{ z^{-(j-1)} \cdot Exd \left\{ U_j(z_N) \right\}_{N_1} \cdot z_1^{-1} \right\}_{N_1} \right\}_{N_1}$

El modelo es una matriz  $N \times N$  de funciones de transferencia que puede ser fácilmente convertido en un modelo de espacios de estado. Cada una de las funciones de transferencia de la matriz expresa la relación entre una subsecuencia de acciones (salidas del controlador y entradas del modelo) y una subsecuencia de muestras (entradas al controlador y salidas del modelo). Algunos de los elementos de esta matriz serán nulos tras la aplicación de las propiedades de los operadores de *skip* y *expand*. De hecho habrá  $N_1 - 1$  columnas nulas de cada grupo de  $N_1$  consecutivas relativas a las acciones no transmitidas y por tanto perdidas a pesar de haber sido generadas. Asimismo  $N_2 - 1$  filas de cada grupo de  $N_2$  consecutivas también serán nulas, modelando las muestras no transmitidas y por tanto sin posibilidad de ser utilizadas por el controlador. En resumen, cada una de las funciones de transferencia de la matriz modelará la relación entre una muestra recibida y una acción efectivamente transmitida.

#### 4. DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE CONTROL EN ENTORNOS SCBR

##### 4.1 Revisión de alternativas de control

Cuando se plantea el control de este tipo de esquemas, se puede asumir diversas alternativas que conviene conocer antes de plantear la solución propuesta. Resulta además habitual observar previamente una serie de restricciones cuando se plantea el control:

- Comunicación sin pérdidas (*error-free*).
- Mensajes cortos y de longitud constante (única).
- Retardo computacional menor que el periodo de muestreo.
- Desfase (*skew*) constante de relojes emisor-receptor.
- Tráfico de red sin sobrecarga.

Un gran porcentaje del problema planteado por un SCBR lo constituye la existencia de retardos de diversa índole en este tipo de bucles de control. La forma de resolverlo ha llevado a diferentes aportaciones. La forma que inicialmente se consideró fue la técnica del clásico aumento de modelo determinista en tiempo discreto. En este caso se incluyen señales en instantes discretos que asumen los retardos

(normalmente unidad), dando lugar a una matriz de transición que en el caso de conjunto periódico permite estudiar la estabilidad (Zhang *et al*, 2001b, Velasco *et al* 2005; García-Rivera y Barreiro, 2007; Sala, 2005). Dando un paso más allá se desea estudiar la orientación del problema asumiendo la existencia de esta serie de retardos aleatorios, y como suele ser habitual en proyectos de control digital, se puede actuar también aquí de dos formas: Control óptimo estocástico (Nilsson, 1998), que enfoca un problema LQG asumiendo retardos aleatorios y optimizando un cierto índice de comportamiento, o bien mediante la conservativa técnica de los buffers (“*queuing*”) de tal manera que introduciendo colas se asume un retardo artificial adicional que permita considerar un retardo constante y determinista. Estos *buffers* se usan para guardar secuencias de valores de señales que pueden ser usados en observadores-predictores. Hay varias opciones, según se llene el *buffer*. Es habitual la observación de estados y predicción de salidas o acciones de control.

- Predictor determinista. (Luck and Ray, 1994). Se usa un observador de estados y un predictor de acciones de control a partir de salidas anteriores. Se usan colas de diferentes longitudes para almacenar señales intermedias.
- Predictor probabilístico. (Chan and Özgüner, 1995; Krotolica *et al*, 1994). Se le da diferente peso a valores almacenados en colas tras analizar la probabilidad de que sean predichos o reales

Esta perspectiva considerada por la metodología de colas también se puede plantear, desde el punto de vista del muestreo, introduciendo un sistema multifrecuencial de igual forma a como se puede tratar en un bucle de control digital convencional el retardo de cómputo considerando un número entero de periodo de muestreo de retardo.

Otras opciones que se pueden considerar son:

- Método de la Perturbación. Sólo válido para sistemas con un T muy pequeño y en redes basadas en prioridades. (Beldiman *et al*, 2001).
- Planificación del periodo de muestreo. (Hong, 1995, Park *et al*, 2002). Previén la elección de un periodo de muestreo que minore el efecto de los retardos aleatorios presentes.
- Control Robusto. Varios autores. Los límites de los retardos deben ser conocidos a priori. Se basa en un modelo de distribución de los retardos. (Baños y Barreiro, 2007; Sala, 2005).
- Métodos basados en lógica borrosa. (Lee *et al*, 2003).
- Metodología basada en eventos. (Tarn and Xi, 1998). Se basa en modificar la referencia remota para incidir en la parte local

A nuestro juicio, mención especial merece el método de adaptación del control por parte del usuario final, basada en la consideración de procedimientos de cálculo por parte del programa que gestione la red (middleware). (Tipsuwan and Chow, 2004a). Se suele trabajar con el contorno de las raíces y tabla *look-up* preestablecida que permiten corregir el control según las condiciones de funcionamiento de la red local.

Antes de pasar a la descripción de los métodos de control introducidos conviene analizar las diferentes combinaciones de políticas de muestreo en el seno de un SCBR (Johannessen, 2004, Poplyts *et al*, 2004).

**Tabla 2. Combinaciones de políticas de muestreo.**

SENSOR	CONTROL	ACCIÓN	SINCRO.	RETRASO
RELOJ	EVENTOS	RELOJ	NO REQUERIDA	MÚLTIPLO DE T
RELOJ	EVENTOS	EVENTOS	NO REQUERIDA	VARIABLE
RELOJ	RELOJ	EVENTOS	REQUERIDA	VARIABLE
RELOJ	RELOJ	RELOJ	REQUERIDA	MÚLTIPLO DE T

En nuestro ámbito de trabajo nos hemos decantado por la consideración de un muestreo guiado por instantes regulares de un reloj para la toma de muestras por parte del sensor que además es la práctica habitual de cualquier montaje de estas características. A continuación se considerará también un guiado por tiempos (regulares) en la etapa de control –lo que indiscutiblemente y si se deseara determinismo exigiría un mecanismo de sincronización de relojes (remoto-local)- pero de tal manera que se ha asumido una frecuencia de muestreo lo suficientemente lenta –siempre se puede saber a priori cuál es la latencia correspondiente al peor caso– como para asegurar que los problemas de muestra vacante o rechazo de muestra no aparecerán. Finalmente en la parte local correspondiente al accionador, se ha considerado las opciones de guiado por tiempos y/o por eventos que conllevarán diferentes técnicas y resultados.

A la hora de plantear alternativas de control en el ámbito de la orientación considerada se pueden asumir varios casos originales diferenciados. Se pueden concebir desde distintas clasificaciones aunque todas ellas tienen el denominador común de asumir tal y como se ha descrito antes, un recorte de las frecuencias de envío desde el emisor. En las dos primeras se asumirá el modelado presentado de forma pura, mientras que en la tercera se considerará una etapa complementaria en local; en este caso se presentarán algunas variaciones originadas por distintas políticas de muestreo. Así pues, se han asumido dos tendencias a la hora de dar respuesta al planteamiento del problema de control. O bien conservando el regulador originalmente diseñado omitiendo la existencia de la red y proponiendo procedimientos adicionales que permitan esta consideración (Casanova *et al*, 2007) –las dos primeras propuestas-, o bien teniendo en cuenta el modelo de red, su forma de funcionamiento y diseñar un nuevo control ad hoc a este entorno con una cierta metodología (Hespanha, 2007; Salt y Albertos, 2005; Salt *et al*, 2006a,b; Casanova *et al*, 2006b; Cuenca *et al*, 2007). Ante cualquier alternativa habrá que contar con un contexto de aplicación de control en tiempo real usando un bus de campo como medio compartido. Si el bus de campo fuese Profibus-DP o una red CAN se debe considerar una serie de trabajos que exponen de forma adecuada diferentes aspectos acerca del modo de funcionamiento y propiedades temporales que inciden en su uso en un entorno de tiempo real. (Kim and Ambike, 2006; Casanova *et al*, 2006a,b; Lee *et al*, 2003; Tovar and Vasques, 1999; Santos *et al*, 2003; Cena *et al*, 1997).

#### 4.2 Control Multivariable

La primera alternativa surge a partir de la consideración del modelo multivariable generado mediante la técnica del estrado del sistema periódico. En este caso se trata de diseñar un clásico controlador multivariable (figura 8) que tiene una importancia adicional porque permite analizar la forma de implementar este tipo de controles en el entorno de control en red. Realmente, el modelo considerado en la figura 8 no existe de la forma que se asume; de forma más próxima a la realidad se puede considerar el esquema mostrado en la figura 9.

Como se puede apreciar, a pesar de asumir un entorno multivariable, la planta sólo presenta una entrada y una salida, por lo que se ha dispuesto un conjunto de interfaces que permitan unir las  $N$  salidas del regulador en diferentes instantes en una única acción de control, y separar  $N$  salidas de la planta en sucesivos  $N$  instantes temporales en una única entrada al controlador. (En el caso de una planta multivariable, habría que realizar esta misma operación con cada una de las entradas y salidas de la planta). Se pueden diseñar teóricamente con cierto éxito diferentes tipos de reguladores pero hay que tener en cuenta que si el sistema estirado presenta una dimensión elevada se podrían presentar problemas numéricos en la implementación de los mismos. Como tercera posibilidad se asumirá un esquema más simplificado del control SCBR que, como se presentará, podrá llevar a la consideración de otras técnicas de control.

4.3 Control con Recuperación de la Información

Se presenta ahora otra opción sobre la base del modelo general introducido y que se ha dado en llamar “recuperación de la información” en el sentido de que al igual que en el caso de observadores se va a inferir aquellos valores de variables que pueden tener una utilidad clara en la aplicación del control pero que en este caso va a seguir un procedimiento basado en señales y con un menor protagonismo de la dinámica conocida o estimada de la planta. Además ahora se va a poder aplicar a sistemas que incluyan no-linealidades. Así pues, se trata de recuperar las muestras/acciones que debido a la limitación del ancho de banda del medio compartido no pueden ser enviadas a través de aquél. Como resulta lógico, se requerirá el modelo de la planta; concretamente se considerará el modelo discreto a periodo básico  $T$ . En el presente caso y a diferencia del control multivariable, la implementación podrá ser fácilmente convertida en un algoritmo secuencial además de resultar un tipo de diseño cuya complejidad no aumentará con la multiplicidad del sistema periódico. Una vez se haya recuperado la información la idea es utilizar el regulador SISO que

originalmente pudiera funcionar aceptablemente en el sistema sin considerar la red local como medio compartido.

La estructura de control periódico considerada se divide en dos partes: reguladores remoto y local. El controlador remoto se muestra en la figura 10 en la que  $Y_{RCX}$  representa la señal recibida en la que solamente una de cada grupo de  $N_2$  muestras consecutivas es efectivamente transmitida por el medio siendo el resto nulas. Por otra parte  $Y_{GEN}$  es la señal generada por el recuperador de información que reemplazará las muestras perdidas en el proceso de transmisión, resultado de restar a la salida del modelo de la planta las muestras que no han podido transmitirse debido a las limitaciones impuestas por el medio compartido. Según esto,  $Y_{GEN}$  es la señal complementaria de la señal recibida. Uniendo ambas señales se puede obtener una señal total  $Y_{REM}$  a periodo  $T$  que recupera el procedimiento de control original. Cabe significar que cuanto más preciso sea el modelo de la planta más se aproximará este caso al ideal. La salida del controlador convencional  $U_{REM}$ , también se verá afectada en su proceso de transmisión a la parte local por el ancho de banda del medio. Es por ello que el mismo procedimiento se puede asumir en la reconstrucción de la señal de control en local tal y como se muestra en la figura 11 en el que ahora son necesarios los modelos de la planta, del controlador usado en la parte remota y de la señal de referencia. En este caso la señal reconstruida  $U_{LOC}$  es inyectada directamente a la planta mediante el accionador convencional a periodo  $T$ .

Si se denota por  $Y_{LOC}(z)$  a la salida de la planta en la parte local a periodo básico  $T$ , tal y como se ha asumido se transmitirá con una frecuencia recortada por un factor de  $N_2$  pues ésta es la multiplicidad observada para el enlace local-remoto, lo cual puede ser descrito como:

$$Y_{L2R}(z_2) = Skp \{ Y_{LOC}(z) \}_{N_2} \tag{7}$$

En la expresión anterior,  $Y_{L2R}(z_2)$  es la señal realmente transmitida. Tras llegar a la parte remota se usará una operación de expansión obteniendo la señal  $Y_{RCX}(z)$  de nuevo a periodo básico que incluirá los valores transmitidos y el relleno con valores nulos.

$$Y_{RCX}(z) = Exd \{ Y_{L2R}(z_2) \}_{N_2} \tag{8}$$

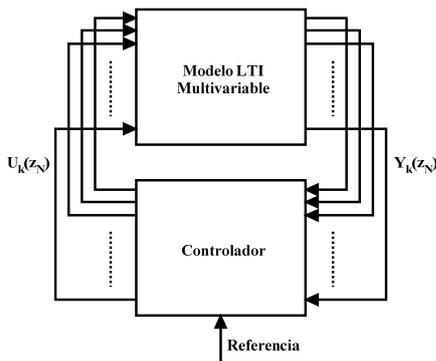


Figura 8. Estructura del control multivariable.

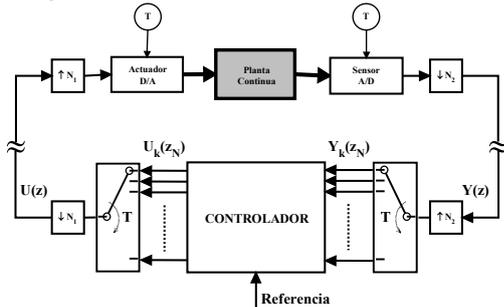


Figura 9. Estructura detallada del control multivariable.

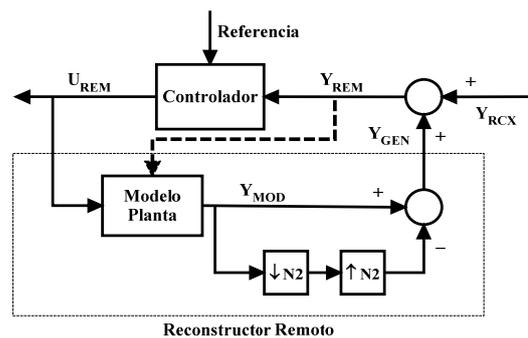


Figura 10. Controlador remoto con recuperación de información.

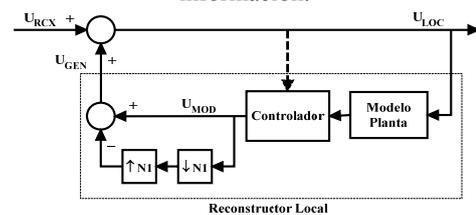


Figura 11. Controlador local con recuperación de información.

Valores nulos que serán reemplazados por la información recuperada tal y como se describió antes. En aras a calcular esta nueva señal se usará el modelo de la planta cuya salida se denotará por  $Y_{MOD}(z)$ :

$$Y_{GEN}(z) = Y_{MOD}(z) - Exd \left\{ Skp \left\{ Y_{MOD}(z) \right\}_{N_2} \right\}_{N_2} \quad (9)$$

Combinando ambas señales (transmitida y recuperada) se obtendrá  $Y_{REM}(z)$ , que será la salida de la planta tal y como la ve el controlador.

$$Y_{REM}(z) = Y_{RCX}(z) + Y_{GEN}(z) = Exd \left\{ Skp \left\{ Y_{LOC}(z) \right\}_{N_2} \right\}_{N_2} + Y_{MOD}(z) - Exd \left\{ Skp \left\{ Y_{MOD}(z) \right\}_{N_2} \right\}_{N_2} \quad (10)$$

La señal  $Y_{REM}(z)$  ya puede ser usada como entrada a un regulador SISO convencional,  $GR(z)$ , tras ser comparada con la referencia  $R(z)$ . La salida de este regulador  $U_{REM}(z)$  ubicado en remoto deberá viajar hasta la posición local de la planta.

$$U_{REM}(z) = (R(z) - Y_{REM}(z)) \cdot G_R(z) \quad (11)$$

Esta señal de control deberá sufrir previamente una reducción de frecuencia dado por la multiplicidad del enlace remoto-local que se ha fijado en  $N_1$  antes de atravesar el medio de transmisión y también de forma paralela y una vez presente en local ser expandida mediante el proceso de relleno con valores nulos  $U_{RCX}(z)$ :

$$U_{R2L}(z) = Skp \left\{ U_{REM}(z) \right\}_{N_1} \quad (12)$$

$$U_{RCX}(z) = Exd \left\{ U_{R2L}(z) \right\}_{N_1} \quad (13)$$

De nuevo, se obtiene, tras el proceso de recuperación de información, la señal  $U_{MOD}(z)$ , que junto a la transmitida permite configurar la señal de control a utilizar.

$$U_{GEN}(z) = U_{MOD}(z) - Exd \left\{ Skp \left\{ U_{MOD}(z) \right\}_{N_1} \right\}_{N_1} \quad (14)$$

La relación entre señales de control en ambas partes del enlace se puede expresar de la forma:

$$U_{LOC}(z) = U_{RCX}(z) + U_{GEN}(z) = Exd \left\{ Skp \left\{ U_{REM}(z) \right\}_{N_1} \right\}_{N_1} + U_{MOD}(z) - Exd \left\{ Skp \left\{ U_{MOD}(z) \right\}_{N_1} \right\}_{N_1} \quad (15)$$

Se considera que el modelo de la planta es  $G_M(z)$  que obviamente diferirá de la planta real que podría considerarse denotada como la función  $G_P(z)$ . Si no hubiesen limitaciones en el enlace remoto-local o bien la recuperación de información fuese ideal, entonces se verificaría que  $U_{REM}(z) = U_{LOC}(z)$ . En estas condiciones la salida de la planta modelada sería:

$$Y_{MOD}(z) = U_{REM}(z) \cdot G_M(z) = U_{LOC}(z) \cdot G_M(z) = Y_{LOC}(z) \frac{G_M(z)}{G_P(z)} \quad (16)$$

Por tanto, si no existiese incertidumbre (modelo ideal), la salida real será igual a la estimada o recuperada. La relación entre las señales de salida local y remota viene dada por:

$$Y_{REM}(z) = Y_{LOC}(z) \frac{G_M(z)}{G_P(z)} - Exd \left\{ Skp \left\{ Y_{LOC}(z) \left( 1 - \frac{G_M(z)}{G_P(z)} \right) \right\}_{N_2} \right\}_{N_2} \quad (17)$$

De nuevo, serán coincidentes si no hay incertidumbre en el modelo de la misma forma que si no hubiese limitación en el proceso de transmisión de señales. En la otra parte del enlace y usando el modelo de la planta, la acción modelada sería:

$$U_{MOD}(z) = (R(z) - Y_{LOC}(z)) \cdot G_R(z) = (R(z) - U_{LOC}(z) \cdot G_M(z)) \cdot G_R(z) \quad (18)$$

Efectivamente si se conoce con exactitud el controlador y la referencia, la calidad de la señal modelada depende del modelo de la planta,  $G_M(z)$ . Adicionalmente si la señal de salida local,

$Y_{LOC}(z)$ , puede ser medida (lo cual es posible puesto que esta recuperación de información se desempeña en la parte local), la acción de control modelada será igual a la acción de control remota y por consiguiente la recuperación será perfecta. De cualquier forma la relación entre ambas viene dada por la siguiente expresión:

$$U_{LOC}(z) = Exd \left\{ Skp \left\{ U_{REM}(z) \right\}_{N_1} \right\}_{N_1} + (R(z) - U_{LOC}(z) \cdot G_M(z)) \cdot G_R(z) - Exd \left\{ Skp \left\{ (R(z) - U_{LOC}(z) \cdot G_M(z)) \cdot G_R(z) \right\}_{N_1} \right\}_{N_1} \quad (19)$$

Cuando se implementa de forma práctica, se debe considerar la existencia de cierto retardo entre las señales transmitida y recibida. Como quiera que en ambas partes del enlace se opera a periodo básico, se puede asumir que este retardo viene dado por un número entero de periodos de muestreo  $MT$  y ello en función de las condiciones de funcionamiento de la red local o bus industrial (tipo de sincronización, ciclo de comunicación, etc.). Puesto que no se ha asumido en las expresiones, el tratamiento de este retardo requiere incorporar un predictor de Smith (1957) -o cualquier otro método afín- (Santacesarea and Scattilini, 1993; Aström *et al*, 1994) en la estructura del regulador convencional (Wittenmark *et al*, 1998; Watanabe *et al*, 1996).

Se desea también incidir en el hecho de que en las anteriores expresiones se ha usado como modelo de la planta una función de transferencia discreta lineal e invariante en el tiempo  $G_M(z)$ . No obstante el método de la recuperación de la información es igualmente válido si se utiliza como modelo cualquier tipo de procesador de señales que eventualmente podría incorporar elementos no-lineales tales como saturaciones, zonas muertas, etc. que resultan tan comunes en aplicaciones prácticas reales.

Como se ha visto en este caso de consideración de observador periódico, se ha empleado la política de guiado por tiempos (*time-driven*) en todos los dispositivos (sensor-controlador y actuador). Habitualmente en esquemas de observadores se emplean muestras anteriores para predecir las pérdidas de acuerdo a diferentes esquemas como los comentados, y ello se suele realizar en la parte remota o servidor almacenándose en la parte local a la que son enviados en ocasiones como lotes de valores que posteriormente son aplicados en los instantes correctos (Kim and Ambike, 2006). En otros trabajos se introducen y analizan estructuras derivadas de filtros de Kalman (Lee and Tomizuka, 2003; Sinopoli *et al*, 2004)

#### 4.4 Control Multifrecuencial

Otra alternativa a la hora de plantear el control es asumir un esquema tal y como el de la figura 12, que sigue la orientación planteada para la resolución del problema de un SCBR. No obstante, la diferencia en este caso es que no se piensa en conservar el diseño monofrecuencia original aportando los valores no transmitidos de la señales intervinientes. La opción que se introduce se basa en aportar un diseño de una parte del regulador a un periodo lento  $NT$  (a efectos de mayor sencillez de tratamiento se considera que  $N_1=N_2=N$ ) en la ubicación remota en la que suele estar el controlador para posteriormente refinar el control en local mediante una segunda parte del controlador. Como resultará fácil intuir, se requiere una parte local dotada de cierta inteligencia o capacidad de cálculo lo que en ocasiones se puede presentar como *smart actuators* (Lee *et al*, 2001) o procedimientos *middleware* (Tipsuwan and Chow, 2004a). Una ventaja adicional que es preciso subrayar es que en este caso el control local conoce cómo ha transcurrido realmente el

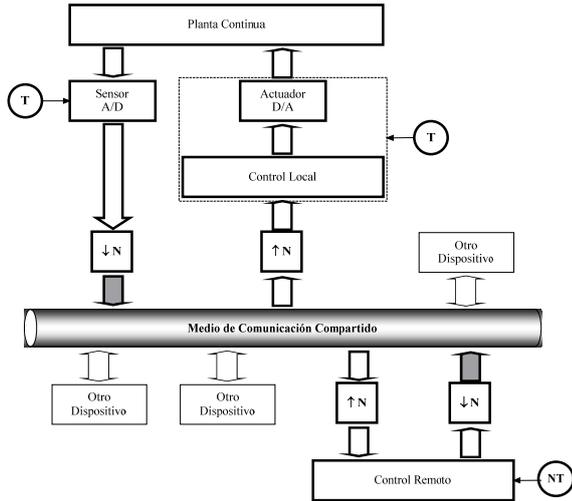


Figura 12. Control multifrecuencia en un SCBR.

procedimiento de transmisión a través del medio de comunicación compartido (existencia de retardos, posibles pérdidas, etc) por lo que puede resultar más preciso que casos alternativos.

Un esquema original basado en un tratamiento de muestras a baja frecuencia en el lado remoto permite la reducción de carga de la red pero sin la necesidad de operaciones de observación/predicción. Una vez en el lado local se habilita una cierta transformación y tratamiento de una secuencia a mayor frecuencia. Este esquema multifrecuencial fue introducido de forma teórica por (Salt y Albertos, 2005) y en un contexto experimental asumiendo un PID con estructura no convencional que luego se describirá en (Salt *et al*, 2006a).

En este caso, el objetivo del diseño es la consecución de un regulador multifrecuencial capaz de manejar una entrada a una frecuencia  $1/NT$  para generar una acción de control a periodo  $T$ , es decir a frecuencia  $N$  veces más rápida que la de entrada, de tal manera que a partir de una planta continua descrita mediante la función de transferencia  $G_p(s)$  se obtenga un comportamiento lo más cercano posible al establecido por una función de bucle cerrado  $M(s)$ . Dicha función  $M(s)$  puede haber sido obtenida mediante la aplicación de un regulador (por ejemplo PID) diseñado a partir del conocimiento del modelo de la planta  $G_p(s)$ . En (Salt y Albertos, 2005) queda descrita exhaustivamente la factible obtención de un regulador de estructura no convencional basado en este modelo de bucle cerrado con la intención de alcanzar el comportamiento de una discretización del modelo de bucle cerrado a frecuencia rápida ( $1/T$ ), pero midiendo la salida del bucle a frecuencia lenta ( $1/NT$ ). El regulador que se obtiene presenta tres partes que representan de derecha a izquierda la parte lenta, la expansión de la misma y el procesado ya a frecuencia rápida.

$$G_R^{T,NT}(z) = \phi(z) \cdot Exd \left\{ \frac{1}{R(z_N) - Skp \{M(z)R(z)\}_N(z_N)} \right\} (z) \quad (20)$$

$$\text{donde } \phi(z) = \frac{M(z) \cdot R(z)}{G_p(z)}$$

En donde se ha denotado el argumento  $z$  o  $z_N$  de  $M$  para representar la discretización con retenedor de orden cero (ZOH) de  $M(s)$  a  $T$  o  $NT$  respectivamente, y análogamente con la referencia del lazo que se designa con  $R$  y con la discretización del modelo del proceso con ZOH  $G_p(s)$ .

Una posible variación del procedimiento de diseño anterior consistiría en asumir como partes lenta y rápida las acciones

integral y derivativa de un PID obtenido bien por discretización de uno continuo calculado por métodos clásicos o bien por métodos de diseño directo en discreto. En este sentido hay que hacer la salvedad que resulta complejo el tratamiento en el dominio de la frecuencia de un sistema multifrecuencia (Cao *et al*, 2005) aunque los autores ya han comenzado a trabajar en este tema (Sandoval y Salt 2007a,b). La estructura en el caso de una cierta discretización (Isermann, 1989) de un clásico PID continuo.

$$u(t) = K_p \left[ e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \right] \quad (21)$$

podría ser la que indica la siguiente expresión:

$$G_R^{T,NT}(z) = K_{PD} \frac{z \left( 1 + \frac{T_d}{T} \right) - \frac{T_d}{T}}{z} Exd \left\{ K_{PI} \frac{z_N - \left( 1 - \frac{NT}{T_i} \right)}{z_N - 1} \right\} (z) \quad (22)$$

en el que se ha considerado que el bloque a frecuencias bajas sea la parte integral, mientras que la parte rápida local sería con lógica el regulador PD. Se puede considerar que  $K_{PD} = K_p$  y  $K_{PI} = 1$ . (Salt *et al*, 2006a).

Evidentemente, de otra forma, hay que habilitar métodos en el servidor de inferir políticas tendentes a corregir este retardo como por ejemplo la interesante aplicación de *middleware* (Tipsuwan and Chow, 2004a).

Con esta formulación puede surgir un problema; el tratamiento del retardo final en la etapa local. Es decir, cuando se asume la existencia de esta etapa de control en local una vez el retardo total es conocido, se puede habilitar algún método que permita resolverlo. Dentro de las técnicas multifrecuenciales, este problema se puede encarar como la determinación de una secuencia de  $N$  acciones de control - *Multi-Rate Input Control* (MRIC) (Cuenca *et al*, 2007)- de tal manera que la primera de ellas se encuentre desfasada. Se introduce ahora un método basado en el modelo multifrecuencial introducido por (Vélez y Salt, 2000) que permite considerar este desfase inicial y así rediseñar los parámetros del PD rápido local en cada iteración en la que obviamente puede variar. Este método es similar al expuesto por (Tipsuwan and Chow, 2004a), pero tiene la ventaja de su aplicación en la parte local; esta es la ventaja primordial de introducir un esquema jerárquico de control en red -*hierarchical NBCS*- y disponer de un elemento local. El trabajo presentado por (Martí *et al*, 2004) introduce la misma orientación conceptual pero asumiendo otra técnica de control en un entorno monofrecuencial. Así pues, en esta ocasión, la parte local se adapta al retardo que se puede dar en la transmisión del enlace remoto-local. En la figura 13 se detalla el cronograma del comportamiento que se va a considerar en esta alternativa de control en la que básicamente se ha considerado una política guiada por tiempos en la parte remota y por eventos en la parte rápida. Cabe subrayar que el procedimiento de diseño es similar al utilizado en el lugar de las raíces, seleccionando puntos de prestaciones fijos hacia cuya consecución tenderá la dupla  $K_p, T_d$  de la parte rápida para cada desfase  $\tau_0$  que obviamente hará variar el modelo inicial -según (Vélez y Salt, 2000)- sobre el que se diseña. Un barrido fuera de línea permite generar una tabla de duplas en función de  $\tau_0$  que determinará la acción que se aplicará en esta etapa final para intentar conseguir un comportamiento que soslaye la existencia de ese desfase inicial en la secuencia MRIC.

La secuencia de operaciones es la siguiente:

- 1) El sensor muestrea cada  $NT$  la salida de la planta (política de tiempos).

- 2) El subcontrolador remoto PI recibe la salida muestreada local de tal manera que el medio compartido requiere un tiempo  $\tau_{S-PI}$ . Existen diversas razones (carga de red, tipo de protocolo de comunicación, etc) por las que este retardo puede ser variable. Una forma posible de tratar este problema es asumiendo un  $\tau_{S-PI}$  máximo correspondiente al peor caso y esperar a este instante para calcular la subacción lenta ya que la etapa local rápida ya se ocupará de implementar una política de eventos para compensar esa espera (el retardo total es computado y compensado por el elemento final de control).
- 3) El subcontrolador PI generan la acción que es enviada al subcontrolador PD a través de la red.
- 4) El subcontrolador PD recibe la acción PI que debido al retardo de red llegará tras  $\tau_{PI-PD}$  unidades de tiempo. Evidentemente este retardo puede ser variable. Así pues en la parte local quedará determinado el retardo total ( $\tau_0 = \tau_{S-PI} + \tau_{PI-PD}$ ).
- 5) El subcontrolador PD se ocupará de generar N acciones de control. La primera de ellas será aplicada con un retardo de  $\tau_0$  unidades de tiempo. Las siguientes ya no quedarán afectadas por el retardo de la red por lo que podrán ser aplicadas en los instantes equiespaciados T unidades de tiempo. En conjunto se puede asumir, pues, una actuación irregular (no uniforme). Si se sigue el método de modelado para este tipo de casos descrito en (Vélez y Salt, 2000, 2004), el esquema de salidas del regulador PD será  $[\tau_0, T, 2T, \dots, (N-1)T]$  cada periodo NT.

Finalmente cabe señalar que de forma práctica se puede haber establecido previamente fuera de línea un periodo de muestreo T que verifique  $T > \tau_0$ . Esta relación puede también determinarse considerando la magnitud que se da en llamar peor caso de la latencia de mensajes (*worst case message latency*). Obviamente queda pendiente el análisis de la estabilidad de este procedimiento de control ya que se está tratando con un sistema variable en el tiempo debido a la variación dinámica del desfase. Una forma viable puede ser mediante LMI (Sala, 2005) pero ello ya excede de la orientación de este artículo.

### 5. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha intentado introducir al lector interesado en el tema de SCBR aportando una serie de referencias básicas y

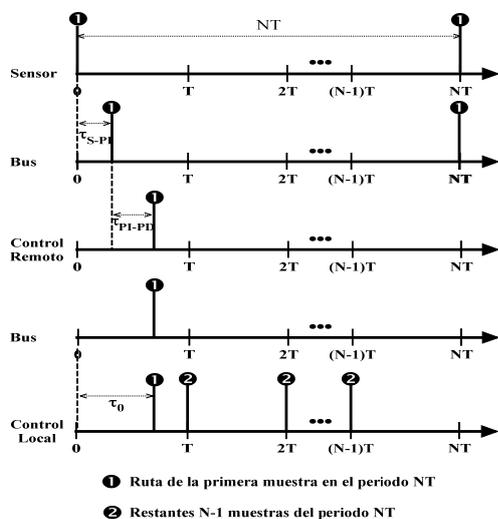


Figura 13. Cronograma de funcionamiento de la propuesta SCBR.

exponiendo brevemente el alcance y problemas derivados de la consideración de este tipo de esquemas y siempre desde la perspectiva de la ingeniería de control. A continuación y desde la misma perspectiva, se ha presentado un resumen de las técnicas de control de un sistema que requiere de la participación de un medio compartido por diferentes bucles y/o señales. Se ha presentado el trabajo específico que se está desarrollando en el seno de nuestro grupo de investigación sobre la base de sistemas con muestreo no-convencional que dan lugar a estructuras tanto de predicción como de control asimismo no-convencionales aportando originales métodos de diseño. Cabe significar que se van sucediendo las aportaciones y números monográficos de revistas JCR dedicados a este tema por lo que solicitamos la comprensión del lector si detectase innovaciones no asumidas en el momento de publicación de este trabajo.

### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido desarrollado en el marco del Proyecto CICYT DPI2006-09162 financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología y fondos FEDER.

Agradecemos los comentarios de nuestro compañero, el Prof. Pedro Albertos, con el que hemos compartido algunas de estas experiencias. También queremos manifestar nuestra gratitud a la excelente revisión anónima realizada.

### REFERENCIAS

Almutairi, N. B. , Chow, M-Y. , Tipsuwan, Y. (2001). Network-based controlled DC motor with fuzzy compensation. Proceedings of the 27th annual conference of IEEE industrial electronics society, Denver (EEUU), pp. 1844-1849.

Almutairi, N. B. , Chow, M-Y. (2003). Stabilization of networked PI control system using fuzzy logic modulation. Proceedings of the 22nd American Control Conference, Denver (EEUU), pp. 975-980.

Almutairi, N. B., Chow, M-Y. (2002). PI parameterization using adaptive fuzzy modulation (AFM) for IP networked PI control systems - Part II: Full adaptation. Proceedings of the 28th annual conference of IEEE industrial electronics society, Sevilla (España), pp. 3158-3163.

Astrom, K.J. , Hang, C.C. , Lim, B.C. (1994). A new Smith predictor for controlling a process with an integrator and long dead-time. IEEE transactions on Automatic Control, vol. 39, no. 2, pp. 343-345.

Bamieh, B., Pearson, J.B., Francis, B.A. , Tannenbaum, A. (1991). A lifting technique for linear periodic systems with applications to sampled-data control. Systems & Control Letters, vol. 17, no. 2 pp. 79-88.

Baños, A., Barreiro, A. (2007) Delay-dependent stability of reset control systems. Proc. American Control Conference, pp. 5509-5515.

Bauer, P.H. , Premaratne, K. (1998). Variable bit-rate control and stability of distributed sensor networks.. Proceedings of IASTED conference on signal processing and communications, Tenerife (España), pp. 199-202.

Bauer, P.H. , Sichiuiu, M. , Premaratne, K. (1999). Closing the loop through communication networks: The case of an integrator plant and multiple controllers. Proceedings of IEEE conference on decision and control", Phoenix (USA), pp. 2180-2185.

- Bauer, P.H. , Sichitiu, M. , Premaratne, K. (2001a). On the nature of the time-variant communication delays. Proceedings of IAESTED conference on modeling, identification and control, Innsbruck (Austria), pp. 792-797.
- Bauer, P.H. , Sichitiu, M. , Premaratne, K. (2001b) Stability of 2-D distributed processes with time-variant communication delays. Proceedings of IEEE ISCAS, Sydney (Australia), vol. II, pp. 497-500.
- Bauer, P.H. , Sichitiu, M. , Lorand, C. , Premaratne, K. (2001c). Total delay compensation in LAN control systems and implications for scheduling. Proceedings of American Control Conference, Arlington (USA), pp. 4300-4305.
- Beldiman, O. , Walsh, G.C. (2000). Predictors for networked control systems. Proceedings of the 19th American Control Conference, Chicago (EEUU), pp. 2347-2351.
- Beldiman, O. , Bushnell L.G. , Walsh, G.C. , Wang, H.O., Hong, Y. (2001). Perturbations in networked control systems. Proceedings of the 2001 ASME IMECE symposium on networked control systems.
- Branicky, M.S. (1997). Stability of hybrid systems: State of the art". Proceedings of the 36th IEEE conference on decision and control, San Diego (EEUU), pp. 120-125.
- Branicky, M.S. , Borkar, V.S. , Mitter, S.K. (1998). A unified framework for hybrid control: Model and optimal control theory. IEEE transactions on Automatic Control, vol. 43, no. 1, pp. 31-45.
- Branicky, M.S. , Phillips, S.M. , Zhang, W. (2000). Stability of networked control systems: Explicit analysis of delay Proceedings of the 19th American Control Conference, Chicago (EEUU), pp. 2352-2357.
- Branicky, M.S. , Phillips, S.M. , Zhang, W. (2002). Scheduling and feedback co-design for networked control systems. Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control, Las Vegas (EEUU), pp. 1211-1217.
- Branicky, M.S. , Liberatore, V. , Phillips, S.M. (2003). Networked control system co-simulation for co-design. Proceedings of the 22nd American Control Conference, Denver (EEUU), pp. 3341-3346.
- Bushnell L.G. (2001). Networks and control. IEEE Control Systems Magazine, vol. 21, no. 1, pp. 22-23.
- Calvo, I, Marcos, M., Orive, D., Sarachaga, I. (2006). Methodology Based on Distributed Object Oriented Technologies for Providing Remote Access to Industrial Plants. Control Engineering Practice, Vol 14, NIM 8, August, 2006, pp:975-990, Elsevier.
- Cao, W-J., Liu, X., Lim, C, Soh, Y-C. (2005). Frequency-domain Transfer Function of digital multirate controller with current estimator. IEEE transactions on Control Systems Technology, vol. 13, n° 1.
- Casanova, V., Salt, J. (2000). Multirate control for an ICCS environment. Part I: The random access delays. Proceedings of 2nd IFAC Workshop on linear time delay systems, Ancona (Italia).
- Casanova, V., Salt, J. (2002). Real-time implementation of multirate control techniques for an ICCS. Proceedings of 15th IFAC world congress, Barcelona (España).
- Casanova, V., 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., Salt, J. (2004). Digital modeling and control with irregular D/A conversion. Proceedings of 2nd International conference on computing, communication and control technologies (Volume IV). Austin (EEUU).
- Casanova, V., Mascaros, V., Salt, J., Cuenca, A. (2006a). Simulation Model for a Networked Control System over Profibus DP. Proc. of the IEEE CCA/CACSD/ISIC. Munich.
- Casanova, V., Salt, J., Cuenca, A. (2006b). Irregular actuation and sampling in a networked control system over Profibus-DP. Proceedings of 32nd annual conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Paris (France).
- Casanova, V., Salt, J., Cuenca, A., Pizá, R. (2007). Networked control systems with information recovery over Profibus-DP. Proceedings of the 7th International Conference on Fieldbuses and Networks in Industrial and Embedded Systems, Toulouse (France).
- Cena, G., Demartini, C., Valenzano, A. (1997). On the performances of two popular fieldbuses. Proceedings IEEE international workshop on factory communication systems", pp. 177-186.
- Coffey, T.C. , Williams, I.J. (1966). Stability analysis of multiloop, multirate sampled systems. AIAA Journal of Guidance, Control and Dynamics, vol. 4, no. 12, pp. 2178-2190.
- Cuenca, A. Salt, J., Albertos, P. (2007). Implementation of algebraic controllers for non-conventional sampled data systems. Real Time Systems. Vol. 35, pp. 59-89.
- Chan, H., Özgüner, Ü. (1995). Closed-loop control of systems over a communication network with queues. Int. J. Control, vol. 62, n° 3, pp. 493-510.
- Chow, M-Y. , Tipsuwan, Y. (2001a). Network-based control systems: A tutorial. Proceedings of the 27th annual conference of IEEE industrial electronics society, Denver (EEUU), pp. 1593-1602.
- Chow, M-Y. , Tipsuwan, Y. (2001b). Network-based control adaptation for network QoS variation. Proceedings of 2001 IEEE military communications conference, Vienna (EEUU), pp. 257-261.
- Chow, M-Y., Tipsuwan, Y. (2003). Gain Adaptation of Networked DC Motor Controllers based on QOS Variations. IEEE transactions on Industrial Electronics, vol. 5, n° 5.
- Chow, M-Y. (2003). Methodologies in time sensitive network-based control systems. IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Kobe (Japón).
- Estevez, E., Marcos, M., Orive, D. (2007). Automatic Generation of PLC Automation Projects from Component-Based Models. The Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology. Editorial Springer.
- Francis, B.A., Georgiou, T.T. (1988). Stability theory for linear time-invariant plants with periodic digital controllers. IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 33, no. 9, pp. 820-832.

- García-Rivera, M.; A. Barreiro (2007). Analysis of Networked Control Systems with Drops and Variable Delays., *Automatica*. (article in Press).
- Goodwin, G.C., Quevedo, D.E., Silva, E.I. (2006). An Introduction to Networked Control Systems. Proceedings of Asian Control Conference 2006. ASCC06. Plenary Lecture.
- Gopinath, R.A., Burms, C.S. (1994). On upsampling, downsampling, and rational sampling rate filter banks. *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 42, no. 4, pp. 812-824.
- Halevi, Y., Ray, A. (1988a). Integrated Communication and Control Systems: Part I-Analysis.. *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol. 110, pp. 367-373.
- Halevi, Y., Ray, A. (1988b). Integrated Communication and Control Systems: Part II-Design Considerations. *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol. 110, pp. 374-381.
- Halevi, Y., Ray, A. (1990). Performance analysis of integrated communication and control systems networks. *ASME Journal of dynamics systems, measurement and control*, vol. 112, pp. 365-370.
- Hespanha, J., Naghshtabrizi, P., Xu, Y. (2007). A survey of Recent Results in Networked Control Systems. *Proceeding of IEEE*, Vol 95, n° 1, pp. 138-162.
- Hong, S.H. (1995). Scheduling algorithm of data sampling times in the integrated communication and control systems. *IEEE transactions on Control Systems Technology*, Vol. 3, n° 2, pp. 25-230.
- Isermann, R. (1989). *Digital Control Systems*. Ed. Springer Verlag.
- Johannessen, S. (2004). Time Synchronization in a Local Area Network. *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 24, n° 2.
- Khargonekar, P.P., Poolla, K., Tannenbaum, A.S. (1985). Robust control of linear time-invariant plant using periodic compensation. *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 30, pp. 1088-1096.
- Kim, W-J., Ji, K., Ambike, A. (2006). Real-Time Operating Environment for Networked Control Systems. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, Vol. 3, n° 3.
- Krotolica, R., Özgüner, U., Chan, H., Goktas, H., Winkelman, J., Liubakka, M. (1994). Stability of linear feedback systems with random communication delays. *International Journal of Control*, vol. 59, no. 4, pp. 925-953.
- Lee, D., Allan, J., Thompson, H. A., Benett, S. (2001). PID control for a distributed system with a smart actuator. *Control Engineering Practice*, vol 9, pp. 1235-1244.
- Lee, K.C., Lee, S., Lee, M.H. (2003). Remote Fuzzy Logic Control of Networked Control System via Profibus-DP. *IEEE transactions on Industrial Electronics*, vol. 50, n° 4.
- Lee, K.C., Lee, S., Lee, M.H. (2006). QoS-Based Remote Control of Networked Control Systems via Profibus Token Passing Control. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 1, n° 3.
- Lee, D-J., Tomizuka, M. (2003). Multirate Optimal State Estimation with Sensor Fusion. *Proc. Of the American Control Conference*, Denver, Colorado. June 4-6.
- Lian, F-L., Moyne, J.R., Tilbury, D.M. (2000). Control performance study of a networked machining cell. *Proceedings of the 19th American Control Conference*, Chicago (EEUU), pp. 2337-2341.
- Lian, F-L., Moyne, J.R., Tilbury, D.M. (2001a). Performance evaluation of control networks: Ethernet, ControlNet, and DeviceNet. *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 21, no. 1, pp. 66-83.
- Lian, F-L., Moyne, J.R., Tilbury, D.M. (2001b). Analysis and modeling of networked control systems : MIMO case with multiple time delays. *Proceedings of American Control Conference*, Arlington (USA), pp. 4306-4312.
- Lian, F-L., Moyne, J.R., Tilbury, D.M. (2001c) Time delay modeling and sample time selection for networked control systems. *Proceedings of ASME dynamics systems and control division*.
- Lian, F-L., Moyne, J.R., Tilbury, D.M. (2002a). Optimal controller design and evaluation for a class of networked control systems with distributed constant delays. *Proceedings of American Control Conference*, Anchorage (USA), pp. 3009-3014.
- Lian, F-L., Moyne, J.R., Tilbury, D.M. (2002b). Network design consideration for distributed control systems. *IEEE transactions on Control Systems Technology*, vol. 10, no. 2, pp. 297-307.
- Lian, F-L., Yook, J.K., Otanez, P.G., Tilbury, D.M., Moyne, J.R. (2003). Design of sampling and transmission rates for achieving control and communication performance in networked agent systems. *Proceedings of the 22nd American Control Conference*, Denver (EEUU), pp. 3329-3334.
- Liou, L.W., Ray, A. (1990). Integrated communication and control systems: Part III - Nonidentical sensor and controller sampling. *ASME Journal of dynamics systems, measurement and control*, vol. 112, pp. 357-364.
- Liou, L.W., Ray, A. (1990). On modelling of integrated communication and control systems. *ASME Journal of dynamic dystems, measurement and control*, vol. 112, pp. 790-794.
- Liou, L.W., Ray, A. (1991a). A stochastic regulator for integrated communication and control systems: Part I – Formulation of control law. *ASME Journal of dynamics systems, measurement and control*, vol. 113, pp. 604-611.
- Liou, L.W., Ray, A. (1991b). A Stochastic Regulator for integrated communication and control systems: Part II – Numerical analysis and simulation. *ASME Journal of dynamic dystems, measurement and control*, vol. 113, pp. 612-619.
- Lorand, C., Sichitiu, M., Bauer, P.H., Schmidt, G. (2000). Stability of first orden discrete time systems with time-variant communication delays in the feedback path. *Proceedings of IEEE Asia Pacific conference on circuits and systems*, Tianjin (China).
- Luck, R., Ray A. (1990). An observer-based compensator for distributed delays. *Automatica*, vol. 26, no. 5, pp. 903-908.

- Luck, R. , A. Ray. (1994). Experimental verification of a delay compensation algorithm for integrated communication and control systems. *International Journal of Control*, vol. 59, no. 6, pp. 1357-1372.
- Martí, P., Yépez, J., Velasco, M., Villà, R., Fuertes, J.M.. (2004). Managing Quality of Control in networked-based control systems by controller and message scheduling co-design., *IEEE transactions on Industrial Electronics*, Vol. 51, No. 6, pp. 1159-1167.
- Montestruque y Antsaklis. (2003a). On the model-based control of networked systems. *Automatica*, vol. 39, n° 10 , pp. 1837-1843.
- Montestruque y Antsaklis. (2003b). Stochastic stability for model-based networked control systems. *Proceedings of de American Control Conference*, Volume: 5, pp: 4119-4124.
- Montestruque y Antsaklis. (2004). Stability of Model-Based networked control systems with time-varying transmission times. *IEEE transactions on Automatic Control*, vol. 49, n° 9, September 2004.
- Moyne, J.R. , Tilbury, D.M. (2007). The Emergence of Industrial Control Networks for Manufacturing Control, Diagnostics, and Safety Data. *Proceedings of the IEEE*. Vol. 95, n°1, pp. 29-47.
- Nilsson, J. (1998). Real-time control systems with delays. Ph.D. thesis, Lund Institute of Technology (Sweden). (1998).
- Otanez, P.G. , Moyne, J.R. , Tilbury, D.M. (2002a). Using deadbands to reduce communication in networked control systems. *Proceedings of American Control Conference*, Anchorage (USA).
- Otanez, P.G. , Parrott, J.T. , Moyne, J.R. , Tilbury, D.M. (2002b). The implications of ethernet as a control network. *Proceedings of global powertrain conference*, Ann Arbor (USA).
- Park, H.S. , Kim, Y.H. , Kim, D-S. , Kwon, W.H. (2002). A scheduling method for network-based control systems. *IEEE transactions on Control Systems Technology*, vol. 10, no. 3, pp. 318-330.
- Poplys, N.J. Kawka, P.A., Alleyne, A.G. (2004). Closed-Loop control over Wireless Networks. *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 24, n° 3.
- Ray, A. (1989). Introduction to networking for integrated control systems. *IEEE Control System Magazine*, vol. 9, no. 1, pp. 76-79.
- Ray, A. (1994). Output feedback control under randomly varying distributed delays. *Journal of guidance, control and dynamics*, vol. 17, no. 4, pp. 701-711.
- Sala, A. (2005). Computer Control under Time-varying sampling period: an LMI gridding approach. *Automatica*, Vol. 41, pp. 2077-2082.
- Sala, A. (2007). Improving Performance Under Sampling-Rate Variations via Generalized Hold Functions. *IEEE transactions on Control Systems Technology*, vol. 15, n.4 , pp. 794-797.
- Salt, J., Casanova, V. (2000). Multirate control for an ICCS environment. Part II: The time skew problem. *Proceedings of 2nd IFAC Workshop on linear time delay systems*, Ancona (Italia).
- Salt, J., Cuenca, A. (2002). "Algebraic design of multirate controllers". *Proceedings of 15th IFAC world congress*, Barcelona (España).
- Salt, J., Casanova, V. (2004). Digital modeling and control with irregular A/D conversion. *Proceedings of 2nd International conference on computing, communication and control technologies (Volume IV)*. Austin (EEUU).
- Salt, J., Albertos, P. (2005). Model-based multirate controllers design. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 13, no. 6, pp. 988-997. (2005).
- Salt, J., Cuenca, A., Casanova, V., Mascaros, V. (2006a). A PID Dual Rate Controller Implementation over a Networked Control System. *Proceedings of the IEEE CCA/CACSD/ISIC*. Munich.
- Salt, J., Cuenca, A., Albertos, P. , Casanova, V (2006b). Algebraic design of multi-rate control systems for environments with limited random delays. *Proceedings of 32nd annual conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Paris (France).
- Sandoval J., Salt J. (2007). Calculation of the approximated Frequency Response of Sampled-Data Systems using Kranc Operators. *Proceedings of the IEEE Electronics, Robotics, and Automotive Mechanics Conference*, Cuernavaca, Morelos, México, pp.118-122.
- Sandoval J., Salt J. (2007). Ajuste estructural basado en la respuesta en frecuencia de reguladores bifrecuenciales. *Actas del XXIV Congreso Internacional de Ingeniería Electrónica*, Chihuahua, México, pp. 509-514.
- Santacesaria, C. , Scattolini, R. (1993). Easy tuning of Smith predictor in presence of delay uncertainty. *Automatica*, vol. 29, no. 6, pp. 1595-1597. (1993).
- Santos, M., Stemmer, M., Vasques, F. (2003). Evaluation of the Timing Properties of Two Control Networks: CAN and PROFIBUS. *International Symposium on Industrial Electronics 2003, ISIE'03*. Vol. 2, pp.874-879.
- Sichitiu, M. , Bauer, P.H. , Premaratne, K. (2001) The effect of uncertain time variant delays in ATM networks with explicit rate feedback. *Proceedings of American Control Conference*, Arlington (USA), pp. 4537-4543.
- Sinopoli, B., Schenato, L, Franceschetti, M., Poolla, K., Jordan, M.I., Sastry, S.S. Kalman filtering with intermittent observatios. *IEEE transactions on Automatic Control*, vol. 49, n° 9, pp.1453-1464, Sep. 2004.
- Smith, O.J.M. (1957). Close control of loops with dead time. *Chemical Engineering Progress*, vol. 53, no. 5, pp. 217-219.
- Tarn, T.J., Xi, N. (1998). Planning and control of internet-based teleoperation. *Proceedings of SPIE: Telem manipulator and telepresence technologies*, Vol. 3524, pp. 189-193, Boston, MA.
- Tipsuwan, Y. , Chow, M-Y. (2001). Network-based controller adaptation based on QoS negotiation and deterioration. *Proceedings of the 27th annual conference of IEEE industrial electronics society*, Denver (EEUU), pp. 1794-1799.
- Tipsuwan, Y., Chow, M-Y. (2002a). Gain adaptation of networked mobile robot to compensate QoS deterioration. *Proceedings of the 28th annual conference of IEEE industrial electronics society*, Sevilla (España), pp. 3146-3155.

- Tipsuwan, Y. Chow, M-Y. (2002b). PI Parameterization using adaptive fuzzy modulation (AFM) for networked control systems-Part I: Partial Adaptation. Proceedings IEEE IECON '02, , pp. 3152-3157, Seville, Spain.
- Tipsuwan, Y. Chow, M-Y. (2003). Control Methodologies in networked control systems. Control Engineering Practice, vol. 11, pp. 1099-1111.
- Tipsuwan, Y., Chow, M-Y. (2004a). Gain Scheduler Middleware: A methodology to enable existing controllers for networked control and teleoperation- Part I: Networked Control., IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 51, n° 6.
- Tipsuwan, Y. , Chow, M-Y. (2004b). Gain scheduler middleware: A methodology to enable existing controllers for networked control and teleoperation - Part II: Teleoperations. IEEE transactions on Industrial Electronics, vol. 51, no. 6, pp. 1228-1237.
- Tipsuwan, Y. Chow, M-Y. (2004c). On the gain scheduling for a networked PI controller over IP network.. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 9, n° 3.
- Törngren, M. (1995). Modelling and design of distributed real-time control applications.. Ph.D. thesis, Royal Institute of Technology (Sweden).
- Törngren, M. (1998). Fundamentals of implementing real-time control applications in distributed computer systems. Real-time systems, vol. 14, pp. 219-250.
- Tovar, E., Vasques, F. (1999). Real-Time Fieldbus Communications using Profibus Networks. IEEE transactions on Industrial Electronics, Vol. 46, n° 6.
- Velasco, M.; Marti, P.; Villa, R.; Fuertes, J.M. (2005). Stability of networked control systems with bounded sampling rates and time delays. Industrial Electronics Society, 2005. IECON 2005. 32nd Annual Conference of IEEE.
- Vélez, C.M. , Salt, J. (2000). Simulation of irregular multirate systems. Proceedings of 8th symposium of computer aided control system design, Salford (Gran Bretaña).
- Vélez, C.M. , Salt, J. (2004). "Control multifrecuencia en tiempo real utilizando herramientas CASCD". Revista iberoamericana de automática e informática industrial, vol. 1, pp. 43-52.
- Walsh, G.C., Ye, H. (2001) Scheduling of Networked Control Systems. IEEE Control Systems Magazine, pp.57-65.
- Walsh, G.C. , Beldiman, O. , Bushnell L.G. (2001). Asymptotic behaviour of nonlinear networked control systems. IEEE transactions on automatic control, vol. 46, no. 7, pp. 1093-1097.
- Walsh, G.C., Ye, H., Bushnell. L.G. (2002a) Stability Analysis of Networked Control Systems. IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol.10, n°3, pp.438-446.
- Walsh, G.C. , Beldiman, O. , Bushnell L.G. (2002b). Error encoding algorithms for networked control systems. Automatica, vol. 38, no. 2, pp. 261-267.
- Watanabe, K. , Nobuyama, E. , Kojima, A. (1996). Recent advances in control of time delay systems – A tutorial review. Proceedings of the 35th IEEE Conference on Decision and Control, Kobe (Japan), pp. 2083-2088.
- Wittenmark, B. , Nilsson, J. , Törngren, M. (1995). Timing problems in real-time control systems. Proceedings of American control conference, Seattle (USA), pp. 2000-2004.
- Wittenmark, B., Bastian, B., Nilsson, J. (1998). Analysis of Time Delays in Synchronous and Asynchronous Control Loops. Proc. Of the 37th IEEE Conference on Decision and Control, Florida, USA.
- Yang, T.C. (2006). Networked Control System: a brief survey. IEE Proc.-Control Theory Appl. Vol 153, n° 4.
- Yook, J.K. , Tilbury, D.M. , Sopakar, N.R. (2001). A design method for distributed control systems to optimize in the presence of time delays. International Journal of Control, vol. 74, no. 1 pp. 58-76.
- Yook, J.K. , Tilbury, D.M. , Sopakar, N.R. (2002). Trading computation for bandwidth: reducing communication in distributed control systems using state estimators. IEEE transactions on control systems technology, vol. 10, no. 4, pp. 503-518.
- Zhang, W., Branicky, M.S. (2001). Stability of networked control systems with time-varying transmission period. Proceedings of the 39th Allerton conference on communication, control, and computing, Urbana (EEUU).
- Zhang, W., Branicky, M.S. , Phillips, S.R. (2001). Stability of networked control systems. IEEE Control Systems Magazine, vol. 21, no. 1, pp. 84-99.