

Arquitectura multi-controlador con transferencia sin salto para procesos con conmutación de modos

Nagore Iriondo^{*}, Elisabet Estévez^{**}, Rafael Priego^{*}, Marga Marcos^{*}

^{*} Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, ETSI Bilbao, UPV/EHU, Alda. Urkijo S/N, Bilbao

^{**} Departamento de Ingeniería de Electrónica y Automática, EPS de Jaén, UJA, Campus las Lagunillas S/N, 23071, Jaén, España.

Resumen

Los sistemas con conmutación de modos se definen como aquéllos que pueden exhibir diferente comportamiento dinámico en función del estado en que se encuentran. Pueden por tanto ser descritos por un conjunto finito de subsistemas dinámicos y una lógica que rige la conmutación entre ellos. Una alternativa para su control es la arquitectura multi-controlador con supervisión ya que permite utilizar controladores de modo diferentes y alcanzar así múltiples objetivos de control. Pero la conmutación de controladores suele tener como consecuencia la aparición de saltos o transitorios derivados que pueden ser inaceptables. Este tipo de sistemas y problemática son frecuentes en diferentes áreas de aplicación industrial, en donde la tecnología de control más utilizada es el Controlador Lógico Programable (PLC). Es por ello que el objetivo de este trabajo es presentar un método de diseño e implementación de un mecanismo de transferencia sin salto (BT) en una arquitectura multi-modo y multi-bucle para sistemas con conmutación de modos, en PLC y en conformidad con el estándar IEC 61131-3. La estrategia BT se basa en que controladores de modos candidatos a conmutar realicen un seguimiento a los controladores activos, siendo la detección del estado de operación actual y de los posibles estados siguientes, clave en la definición de la forma de ejecución de los algoritmos de control que componen la arquitectura. Se presentan también los pasos del diseño de la arquitectura completa así como resultados experimentales que validan la arquitectura. *Copyright © 2013 CEA. Publicado por Elsevier España, S.L. Todos los derechos reservados.*

Palabras Clave:

Sistemas con conmutación de modos, Supervisión, Planificación conducida por tiempo, Bumpless Transfer, estándar IEC 61131-3

1. Introducción

El estudio de los *Sistemas Híbridos* es en la actualidad un área de investigación muy activa, impulsada por el rápido desarrollo tecnológico, que permite que expertos de distintos campos como la ingeniería de control y la ingeniería de software trabajen conjuntamente en el desarrollo de herramientas para sistemas híbridos. Estos sistemas se caracterizan porque combinan dinámicas continuas y discretas, pudiéndose encontrar ejemplos en todas las áreas de la industria: en (Zambrano *et al*, 2010) se modela una planta de aire acondicionado solar como un sistema híbrido de configuración variable sometido a perturbaciones en su principal fuente de energía, la radiación solar. (Bhagwat *et al*, 2003) estudia aplicaciones de tratamiento de aguas. (Rodrigues *et al*, 2008) aplican estos modelos a sistemas eléctricos de potencia. Otro campo de interés es el de la industria de procesos químicos, donde es frecuente que múltiples modos de operación de una planta den lugar a múltiples regiones de operación nominales. Ejemplos de trabajos que tratan el modelado y control de

procesos sometidos a cambios en las condiciones de operación pueden encontrarse en plantas de purificación de metanol (Maestri *et al*, 2009) o en procesos reactivos (Downs and Vogel, 1993) en el que se definen seis modos de operación en función de la relación másica entre ciertos productos reactivos. El cambio de crudo en refinerías también es ejemplo de transiciones de proceso (Gómez *et al*, 2010). La mayoría de estos trabajos están enfocados a la detección de fallos debidos a transiciones entre modos de operación (Fuente *et al*, 2007).

Los sistemas con conmutación de modos son un tipo de sistema híbrido que representan a procesos industriales que operan en diferentes modos en los que las dinámicas continuas son diferentes (Sun and Ge, 2005). La diferencia de dinámicas puede ser debida tanto a aspectos inherentes o estructurales del proceso, como a condiciones de operación. Los problemas de control estudiados para este tipo de sistemas están fundamentalmente relacionados con la estabilización del control en las conmutaciones (Lin and Antsaklis, 2009), la controlabilidad y observabilidad (Gómez *et al*, 2010) y el control óptimo (Engell and Stursberg, 2005), (Bengea and DeCarlo,

^{*}Autor en correspondencia.

Correo electrónico: nagore.iriondo@ehu.es

2005). El estudio de los sistemas lineales conmutados también ha permitido dar distinto enfoque y solución a otros problemas de control más sofisticados como el control inteligente (Ravindranathan and Leitch, 1999), la planificación de ganancia o el control adaptativo (Hilhorst *et al*, 1994), (Hespanha *et al*, 2003).

En la industria de proceso en general, es habitual utilizar estrategias clásicas de control lineal basadas en bucles PID para la regulación de variables de proceso (Henriques *et al*, 1999), (Pasamontes *et al*, 2011). Con el propósito de ampliar los rangos de operación de los sistemas de control y tratar las diferentes dinámicas, se pueden plantear estrategias basadas en utilizar algoritmos de control diferentes específicamente diseñados para los diferentes modos de operación y reglas para la conmutación entre los distintos algoritmos de control (Liberzon, 2003). Estas estrategias han demostrado la potencialidad de integrar la lógica basada en reglas junto con técnicas de control realimentado (Morse, 1995), (Rodríguez *et al*, 2003).

Una arquitectura multi-control puede, por lo tanto, mejorar la respuesta transitoria permitiendo alcanzar múltiples objetivos, pero como consecuencia de la conmutación entre controladores, pueden producirse saltos en la entrada de la planta. Dada la importancia práctica que este efecto tiene en las aplicaciones de control, han sido numerosas las investigaciones y propuestas de estrategias BT (Bumpless-Transfer) para mejorar los transitorios derivados de la conmutación. Algunas de estas están basadas en la ejecución paralela tanto del controlador on-line como de los controladores off-line con objeto de facilitar la conmutación; por ejemplo, en (Kinnaert *et al*, 2009) la señal de control activa se utiliza para actualizar las señales de los controladores off-line. Bajo esta aproximación, y dada la similitud en el efecto de ambos fenómenos, una alternativa ha sido el estudio conjunto de las técnicas BT con las técnicas AW (Anti-Windup), mediante la observación de la no linealidad a la entrada de la planta (Åström and Wittenmark, 1990), (Hanus *et al*, 1987), (Peng *et al*, 1996), (Zaccarian and Teel, 2005), (Yamé and Hanping, 2010). También se han propuesto otras técnicas basadas en la definición de estados comunes de los controladores, como (Morse, 1996) o (Lourenço and Lemos, 2006), que utilizan un integrador común a todo el banco de controladores. Otras aproximaciones se basan en modificar la operación de los controladores candidatos a la conmutación introduciéndolos en un bucle de seguimiento al control activo mediante un controlador adicional (Graebe and Ahlén, 1996a, b). Hay trabajos que extienden o combinan algunas de las técnicas ya propuestas, como (Zhang *et al*, 2005) que combina la técnica de seguimiento de Graebe and Ahlén (1996) con el método de acondicionamiento de la referencia de Hanus *et al* (1987). En Pasamontes *et al* (2010) se analizan diferentes técnicas BT mostrando las ventajas e inconvenientes de cada una de ellas dependiendo de la naturaleza del problema que se trate de resolver. En él, concluyen que el método de seguimiento al control activo es adecuado cuando el tiempo entre conmutaciones es suficientemente grande como para que se alcance el estado estacionario o la señal del controlador latente alcance al activo. Otro trabajo de los mismos autores (Pasamontes *et al*, 2011) propone un mecanismo basado en el seguimiento al activo para la conmutación de un banco de controladores que combinan realimentación con anticipación.

El presente trabajo pretende mejorar el desarrollo de aplicaciones de control industrial en diferentes aspectos. Por un lado, se centra en el nivel más bajo de la pirámide de control. Es decir, el objetivo es controlar un conjunto de variables de proceso

que exhiben un comportamiento dinámico diferente en cada modo de operación del proceso completo. Por tanto, se trata de un problema multi-modo y multi-bucle. Por otro lado, se propone una extensión del mecanismo BT de seguimiento a un sistema multi-bucle, reduciendo la sobrecarga de seguimiento. Por último, se tratan aspectos prácticos de implementación en los controladores de variables de proceso más implantados en la industria, los PLCs. Se diseña y desarrolla un supervisor en arquitectura multi-Modo y multi-Bucle, asegurando que la transferencia se realiza sin salto. Aunque se implementa para el controlador PID, el diseño puede aplicarse a cualquier tipo de controlador, no siendo exclusivo para controladores con acción integral. El principal inconveniente que presenta es que requiere la implementación y ejecución paralela de un conjunto de controladores, lo que aumenta la demanda computacional a medida que aumenta el número de controladores (Pasamontes *et al*, 2010). Para reducir dicho coste, se plantea el diseño del supervisor utilizando técnicas de transformación de modelos, identificando los modos candidatos a conmutación que serán los únicos que ejecuten controladores de seguimiento.

Existen muchas herramientas de simulación del comportamiento dinámico que exportan el modelo del proceso programado. En este trabajo se utiliza Simulink™, aunque el método es aplicable a otras. En cuanto al modelo de control conforme al estándar de programación de PLCs IEC 61131-3 (IEC, 2003), se propone el uso del interfaz PLCopen XML (PLCopen, 2003), (van der Wal, 2009), que surgió con el objetivo de conseguir la interoperabilidad entre herramientas de programación de PLCs (Marcos *et al*, 2009).

La estructura del artículo es la siguiente: en la sección 2 se propone una formulación del supervisor para la arquitectura multi-Modo y multi-Bucle en un esquema de seguimiento a controladores activos. La sección 3 se dedica al procedimiento de diseño del supervisor BT con el objetivo de generar el código en lenguaje ST del estándar IEC 61131-3. La sección 4 muestra, a través de un caso de estudio simple pero ilustrativo, la mejora cuando se utiliza la arquitectura de supervisión propuesta, prestando atención a la mejora producida al dotarla del mecanismo de transferencia sin salto seleccionado. Por último, en la sección 5 se presentan algunas conclusiones.

2. Arquitectura de supervisión y control

En la literatura se ha propuesto la utilización de una arquitectura multi-control para el control de procesos con conmutación de modos. Esta arquitectura es particularmente útil en el control de procesos complejos, especialmente en aquellos casos en que un único controlador no permite realizar un control satisfactorio en todo el rango de operación (Liberzon, 2003). Básicamente, esta arquitectura se basa en seleccionar el algoritmo de control en función del modo de operación. Este trabajo generaliza la arquitectura para sistemas de control formados por múltiples bucles, propone una formulación para el supervisor así como un procedimiento de diseño basado en técnicas de transformación de modelos que permite automatizar la generación del supervisor para su ejecución en PLCs.

La Figura 1 muestra la arquitectura de supervisión y control, en la que el supervisor detecta transiciones de modo que impliquen un cambio de conjunto de algoritmos de control y dirige la conmutación. Además, con el propósito de mejorar transitorios inaceptables que derivan de la conmutación, la arquitectura ha sido extendida con una estrategia BT,

generalización del mecanismo de seguimiento al control activo de Graebe and Ahlén (1996), en la que la señal de un controlador latente (candidato a conmutar) sigue a la señal del controlador activo, con la particularidad de que sólo los controladores asociados a los modos de operación alcanzables realizan el seguimiento. Mediante esta estrategia, los controladores de bucle del modo activo ejecutan su algoritmo básico y actúan sobre el proceso; en cambio, cuando pertenece a un modo alcanzable desde el modo activo, adquiere el rol de un sistema dinámico que es forzado a seguir a la señal de control activa. Cuanto más próximas sean la salida del controlador activo y las salidas de los controladores en seguimiento en el instante de conmutación, los transitorios asociados a la conmutación serán menores.

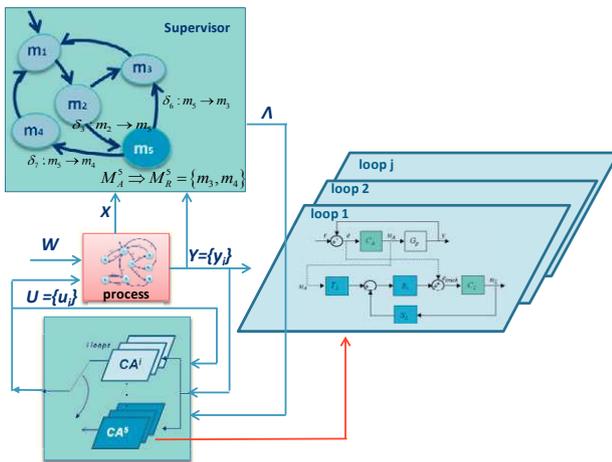


Figura 1: Arquitectura multi-modo y multi-bucle con mecanismo BT

El supervisor de esta arquitectura multi-modo, multi-bucle y con seguimiento BT se puede definir como un AEFD (Autómata de Estado Finito Determinista) con salida, también conocido como máquina de Moore (Hopcroft and Ullman, 1979) que en cada modo debe ejecutar un conjunto de algoritmos de control diferente cumpliendo los requisitos temporales de cada algoritmo, ya que pueden operar con periodos de muestreo distintos. Esto significa que cada modo estará caracterizado por una dinámica discreta distinta, definida por una secuencia de tiempos discretos y una secuencia de algoritmos de control a ejecutar en cada tiempo discreto, aquéllos para los que ha transcurrido su periodo de muestreo.

La salida, por tanto, además de ser función del modo, depende de un tiempo discreto. Su formulación se puede expresar como:

$$S = (M, Y, U, L, T, \Sigma, \delta, CA, I, \tau, \Lambda, O) \quad (1)$$

donde:

M es el conjunto de modos del supervisor, en el que se define $M_0 \in M$ como el conjunto de posibles estados iniciales. $M_A \in M$ define el modo activo en cada instante y $M_R \subseteq P(M)$ el conjunto de agrupaciones de estados alcanzables desde cada modo.

Y es el conjunto de variables controladas, y U el de las variables manipuladas. $L \subseteq Y \times U$ es el conjunto de bucles de control, $l = (y, u) \in L$.

$T \subseteq M \times M$ es el conjunto de transiciones o arcos entre modos, $t = (m, m') \in T$.

Σ es el alfabeto de entrada o conjunto de eventos que disparan las transiciones. La transición queda por tanto definida por un arco y su condición asociada, $T \times \Sigma$.

$\delta: M_A \times \Sigma \rightarrow M_R$ es la función de transición que define el conjunto de modos alcanzables desde cada modo activo.

CA es el conjunto de algoritmos de control agrupados por modo:

$$CA = \{CA^1, CA^2, \dots, CA^n\} = \{CA^i; i=1..n \text{ (modo)}\}.$$

Cada elemento de CA es un subconjunto de algoritmos de control asociados a un modo de operación del proceso:

$$CA^i = \{CA^i_1, CA^i_2, \dots, CA^i_\ell\} = \{CA^i_j; i: \text{modo}, j=1..\ell \text{ (bucle)}\}.$$

El algoritmo de control del bucle j en el modo i está caracterizado por el valor de sus parámetros de configuración y los parámetros de entrada/salida correspondientes a las entradas de proceso y la variable de control, su periodo de muestreo T_j^i , su tiempo de cómputo máximo C_j^i y su plazo D_j^i . Los algoritmos de control ejecutan el algoritmo básico de control del bucle, CA_B , y los algoritmos de seguimiento, CA_I , de todos sus modos alcanzables, $CA^i_j = CA^i_B \times CA^i_I$. La Figura 1, ilustra el controlador activo, CA , y el latente correspondiente, CA_B , con parámetros de configuración TL, RL, CL, SL . RL es el controlador del bucle de seguimiento, CL es el controlador en modo seguimiento, y TL y SL son adaptadores de señal.

$I: M \rightarrow CA | (M_A \rightarrow CA_B) \wedge (M_R \rightarrow CA_I)$ define el invariante de cada modo, que es el conjunto de algoritmos de control que operan en el modo, activos y de seguimiento.

$\tau = \{\tau^1, \tau^2, \dots, \tau^n\} = \{\tau^i | \tau_k^i \in \tau^i; i=1..n, k=1..k^i\}$ define el conjunto de secuencias de tiempo discreto en los que se debe ejecutar un conjunto de algoritmos de control. Cada modo tiene asociada su secuencia de tiempos τ^i formada por k^i elementos.

$\Lambda = \{\Lambda^i, \forall i=1..n, \Lambda_k^i \in \Lambda^i | \Lambda_k^i \subseteq P(CA^i), k=1..k^i\}$ es el alfabeto de salida, o conjunto de acciones de control a ejecutar en los modos.

$O: M \times \tau \rightarrow \Lambda$ es la función de salida, que define la dinámica discreta del modo, es decir, para cada modo y cada instante discreto el conjunto de algoritmos a ejecutar.

3. Diseño de la supervisión

El método de diseño del supervisor parte de la siguiente información:

- El proceso formulado como un sistema con conmutación de modos, con una clara definición del interfaz de E/S y los modos de operación del proceso.
- La composición de los bucles de control (emparejamiento de entradas manipuladas y salidas controladas).
- Los algoritmos de control de todos los bucles sintonizados en todos los modos de operación, definidos por el valor de sus parámetros de configuración y parámetros temporales.

Sea q : estado del proceso, m : estado del supervisor, i : índice de modo, j : índice de bucle. El procedimiento de diseño del supervisor consiste en:

3.1. Modos y transiciones del supervisor

Los **modos** del supervisor se identifican agrupando los modos de proceso que tienen asociado el mismo conjunto de algoritmos de control.

$$Q \times CA^i \rightarrow M \subseteq P(Q) / \forall m \in M \rightarrow CA^i = cte \quad (2)$$

Las **transiciones** entre modos del supervisor se identifican como aquellas transiciones del proceso que implican un cambio de al menos un controlador.

$$E \times M \rightarrow T \subseteq E / \forall e = (q, q') \in E \rightarrow CA^q \neq CA^{q'} \quad (3)$$

La identificación de los modos alcanzables desde cada modo activo,

$$M \times T \rightarrow M_R \quad (4)$$

3.2. Dinámica discreta del modo

En cada modo del supervisor se debe ejecutar de forma periódica su conjunto de algoritmos, tantos como bucles, cada uno de los cuales tiene sus requisitos temporales. Por lo tanto, en cada modo habrá diferentes secuencias de tiempo discreto que planifican la ejecución de los algoritmos, en general entre el instante correspondiente al periodo nT_j^i y el instante en que vence su plazo $nT_j^i + D_j^i$. Así, la salida asociada a cada modo debe definir qué algoritmos ejecutar en qué instantes discretos.

Dado que todas las acciones a planificar son puramente periódicas, se aplican técnicas de planificación estática conducida por tiempo (Liu, 2000). Concretamente, los ejecutivos cíclicos son esquemas muy utilizados en la planificación de actividades periódicas, ya que el comportamiento temporal se repite cada ciclo principal o hiper-periodo, T_M (Zamorano et al, 1997). Éste se calcula como el mínimo común múltiplo de los periodos de todas las actividades periódicas.

Cada ciclo o marco principal se divide a su vez en un número entero de ciclos secundarios, en cada uno de los cuales se activarán algunos de los algoritmos de control.

El ciclo secundario se debe elegir de manera que entre dos activaciones consecutivas de un algoritmo exista, al menos, un ciclo secundario en el que se puede planificar la ejecución del algoritmo, ya que los instantes de planificación coinciden con los comienzos de ciclos secundarios. Además, es deseable que todos los algoritmos quepan al completo en un ciclo secundario. Estas condiciones se resumen en:

$$\begin{aligned} T_s^i &\leq \min(D_j^i) \\ T_s^i &\geq \max(C_j^i) \\ T_M^i &= k^i T_s^i \\ 2T_s^i - mcd\{T_s^i, T_j^i\} &\leq D_j^i \end{aligned} \quad (5)$$

donde, para el modo i , T_s^i es el periodo del ciclo secundario, T_M^i es el periodo del marco principal, y C_j^i , T_j^i y D_j^i representan los requisitos temporales del algoritmo del bucle j en ese modo. Es decir, tiempo de cómputo, periodo de muestreo y plazo, respectivamente.

El mayor valor de T_s que satisfaga (5) será seleccionado como valor inicial del ciclo secundario.

Una vez seleccionado el periodo de ciclo secundario del modo i , T_s^i , se lleva a cabo de forma iterativa la asignación de algoritmos a ciclos secundarios. Para ello, se toman los siguientes criterios:

1. Los algoritmos de modo se ordenan de menor a mayor plazo (o por periodo si $T_j^i = D_j^i$).

2. Siguiendo el orden dado, se asignan las $\frac{T_M}{T_j^i}$ activaciones de cada algoritmo a uno de los posibles marcos secundarios. Toda activación de un algoritmo puede ser asignada a los marcos que comienzan a la vez o después de la activación $(n-1)T_j^i$ y terminan a la vez o antes de su plazo $(n-1)T_j^i + D_j^i$, siendo $n = 1.. \frac{T_M}{T_j^i}$ el

número de activaciones del algoritmo y m el número de marco secundario. Además, para que la ejecución n -ésima pueda ser incluida en la secuencia de un marco, debe quedar suficiente tiempo libre en el marco:

$$C_j^i \leq T_s^i - \Sigma C_l \quad \forall C_l \in \text{marco}$$

donde ΣC_l representa el tiempo de CPU ya asignado a otros algoritmos.

Dado que existe más de una posibilidad de asignación, en el momento en que la asignación de activaciones de alguno de los algoritmos no sea posible, se debe volver atrás para realizar una asignación diferente de los algoritmos anteriores. La búsqueda de una solución se realiza en profundidad y con retroceso, teniendo como objetivo obtener una planificación posible.

De esta manera, cada plan estático establece la secuencia de tiempo discreta del modo y determina los instantes en que se ejecutarán los algoritmos de control. La ejecución será secuencial y se planifica al comienzo de cada ciclo secundario.

$$\tau = \{\tau^i, \forall i = 1..n, \tau_k^i \in \tau^i \mid \tau_k^i = (k-1).T_s^i, (k = 1..k^i)\} \quad (6)$$

El alfabeto de salida agrupa secuencias finitas de algoritmos de control del modo activo junto con secuencias finitas de algoritmos de control de sus modos alcanzables (i : modo activo, r : modo alcanzable, M_R : conjunto de modos alcanzables desde el modo activo i).

$$\Lambda = \{\Lambda^i, \forall i = 1..n, \Lambda_k^i \in \Lambda^i \mid \Lambda_k^i \subseteq P(CA_{B_j}^i) \cup P(CA_r^i), \forall r \in M_R\} \quad (7)$$

Por lo tanto, la función de salida asigna en cada modo y a cada instante discreto (ciclo secundario) (6) la secuencia de algoritmos de modo (7) que le corresponda:

$$O: M^i \times (\tau_k^i = mT_s^i \bmod k^i) \rightarrow \Lambda_k^i \mid (m = 1.. \infty) \wedge (k = 1..k^i) \quad (8)$$

donde m : índice del instante de activación en el transcurso del tiempo y k : índice del instante de activación en un marco principal.

3.3. Supervisión extendida con mecanismo de seguimiento

La introducción del mecanismo de seguimiento a la arquitectura implica que en cada activación de un algoritmo de modo activo se deben ejecutar también los latentes correspondientes.

Una alternativa de diseño consiste en planificar la ejecución de los algoritmos del modo activo y sus correspondientes latentes, diseñando un plan estático global para cada modo que tenga en cuenta sus modos alcanzables. El ejecutivo cíclico se diseña a

partir de los requisitos temporales (periodo, plazo y tiempo de cómputo), tanto de los algoritmos del modo activo como de los algoritmos de todos sus modos alcanzables, independientemente de que ejecuten el algoritmo básico o el de seguimiento (que son excluyentes). Los algoritmos de control, activos y latentes, se ejecutan cada uno con el periodo de muestreo en su modo.

Aunque disminuye la complejidad frente a la generalización directa de la propuesta de Graebe and Ahlén (1996), ya que sólo se tienen en cuenta los modos alcanzables, la complejidad sigue siendo explosiva con el número de modos alcanzables. El factor de utilización total del sistema U será:

$$U = \sum_{j=1}^{\ell} \frac{C_j^a}{T_j^a} + \sum_r \sum_{j=1}^{\ell} \frac{C_j^r}{T_j^r} / \forall r \in M_R \quad (9)$$

donde j : índice de bucle de control, ℓ : número de bucles de control, a : modo activo, r : modo alcanzable, M_R : modos alcanzables desde el modo activo.

Otra alternativa consiste en planificar únicamente los algoritmos de modo, extendiendo el algoritmo de control del modo activo con la ejecución de sus correspondientes latentes. Es decir, se planifica la ejecución de forma que cada vez que se ejecuta un algoritmo de control de bucle activo, en el mismo marco secundario se ejecuten todos los algoritmos del mismo bucle asociados a sus modos alcanzables. Lo que parece lógico ya que los algoritmos de un modo latente deben seguir a la señal del control activo correspondiente.

El hiper-periodo y el periodo de ciclo secundario de este nuevo plan se calculan a partir de los periodos y plazos únicamente de los algoritmos del modo activo. Pero en lo que respecta a la asignación de las activaciones de algoritmos de control de bucle a los ciclos secundarios, hay que considerar que el tiempo de cómputo máximo de cada algoritmo activo es la suma de su tiempo de cómputo más el de todos los algoritmos del mismo bucle correspondientes a sus modos alcanzables, ya que todos ellos se ejecutarán en el mismo marco:

$$C_j^a + \sum_r C_j^r / \forall r \in M_R \quad (10)$$

donde j : índice de bucle de control, ℓ : número de bucles de control, a : modo activo, r : modo alcanzable.

Tanto el algoritmo de control básico como los de seguimiento de sus modos alcanzables se ejecutan con su periodo de muestreo. Esto implica que:

- En el momento en que se produce la conmutación, los valores previos de las señales de los controladores latentes que ahora pasan a ser activos, han sido calculados con el periodo del bucle activo, es decir, en instantes que no se corresponden con los instantes en que deberían haber sido calculados. Problemas derivados del efecto de conmutar periodos de muestreo muy diferentes pueden solucionarse mediante un cálculo por interpolación de la señal de control, de forma que se pueda disponer de los valores de las señales latentes en los instantes en que deberían haber sido calculados de acuerdo a su periodo de muestreo.

- Dado que los algoritmos de seguimiento se pueden ejecutar a diferentes periodos de muestreo, los parámetros de sintonía se calculan en tiempo continuo y se discretizan en cada modo.

4. Implementación en IEC 61131-3

En este apartado se propone una forma de implementar esta arquitectura para su ejecución en PLCs. El estándar IEC 61131-3 proporciona elementos y métodos que permiten estructurar la aplicación en unidades de código reutilizable, y que distintas partes de un programa se ejecuten de forma concurrente y con diferentes periodos de muestreo (Karl-Heinz and Tiegelkamp, 2001).

La arquitectura de supervisión y control se puede implementar como un conjunto de $n+1$ POU's de tipo PROGRAM. Uno de estos programas corresponde al supervisor, que implementa la detección de cambios de modo, y en tal caso, actualiza el modo activo. Su ejecución se programa cíclicamente para detectar los cambios de modo tan pronto como se produzcan (véase Figura 2). Los n programas restantes corresponden a los modos del supervisor, cada uno de los cuales implementa su plan estático.

```

PROGRAM Supervisor
VAR_INPUT
  (*Information needed for detecting mode changes in the process*)
END_VAR
VAR_IN_OUT
  current_mode: SINT;
END_VAR
VAR_OUTPUT
  ReachableModes [1.. n]: BOOL; (* 1 = reachable *)
END_VAR
VAR
  mode: SINT;
END_VAR
(*Evaluation of the conditions for detecting mode changes*)
CASE current_mode OF
  1,..:n:
    (*Evaluation of possible transitions from current mode*)
    (*Mode update*)
    (*Set the states of the reachable modes*)
  END_CASE;
(* Update mode for next execution *)
current_mode := mode;
END_PROGRAM

```

Figura 2: Plantilla de código del supervisor

El programa de modo debe ser periódico, por lo que se asocia a una tarea (*task*) de periodo igual al ciclo secundario del modo. Este programa ejecuta, en función del ciclo secundario en que se encuentre en cada instante, el subconjunto de algoritmos asignados en su plan estático (véase Figura 3). La ordenación de las tareas se realiza siguiendo el criterio de primero la más frecuente. Es decir, ordenadas de menor a mayor ciclo secundario.

Nótese que la implementación que se presenta es adecuada para PLCs dado que el control de las tareas se limita a definir sus parámetros temporales y no está permitida la creación dinámica de tareas. Sin embargo, en otras plataformas se podrían implementar esquemas de tareas que se crean en cada modo en cada instante de conmutación. Este aspecto relacionado con los sistemas de tiempo real con cambios de modo es tratado en el trabajo de (Real and Crespo, 2004), en el que se hace una clasificación de los protocolos y métodos de planificación del transitorio del cambio de modo, es decir, la terminación de tareas del modo antiguo y la activación de las tareas del nuevo modo, y proponen la introducción de offsets, sin sobrepasar los plazos, para la primera activación de las nuevas tareas. Sin embargo, es una problemática que no se va a producir al implementarlo en

PLCs, dado que las tareas estarán predeterminadas y la solicitud de cambio de modo no se produce antes de que finalicen las tareas en curso.

```

TASK Task_n (INTERVAL:=Ts_n, PRIORITY:=n)
PROGRAM Mode_n WITH Task_n
VAR_INPUT
  (*controlled variables and set point values*)
  current_mode: SINT;
  ReachableModes[1..n]: BOOL; (* 1 = reachable*)
  ControllersParams[1..n, 1..i]: ctrl_param;
END_VAR
VAR_IN_OUT
  ControllersSignals[1..n, 1..i]: ctrl_signals; (*Active (manipulated) and Latents control signals*)
END_VAR
VAR
  (*mode loop controllers: POU instances (active and latents) with their configuration parameters*)
END_VAR
VAR RETAIN
  previous_mode: SINT:=1;
  secondary_cycle: SINT:=1;
END_VAR
(*has the system enter in the mode?*)
IF current_mode=n THEN
  IF NOT (current_mode=previous_mode) THEN secondary_cycle:=1;END_IF;
  (*execution of control algorithms depending on the secondary_cycle *)
  CASE secondary_cycle OF
    1..k-1:
      (*execution of the corresponding ACTIVE loop controllers: BASIC ALGORITHM*)
      (*execution of the corresponding LATENT loop controllers: TRACKING ALGORITHM*)
      (*update the control signals*)
      secondary_cycle++;
    k:
      (*execution of the corresponding ACTIVE loop controllers: BASIC ALGORITHM *)
      (*execution of the corresponding LATENT loop controllers: TRACKING ALGORITHM *)
      (*update the control signal*)
      secondary_cycle:=1;
  END_CASE;
  (* update manipulated variables*)
  previous_mode:=current_mode;
END_IF;
END_PROGRAM
    
```

Figura 3: Plantilla de código del modo

Los tipos de algoritmos de control se implementan como POU's de tipo *Function Block*. En los programas de modo se instancian los algoritmos de control de bucle con los parámetros de configuración del algoritmo básico y los de sus latentes correspondientes discretizados con el periodo de muestreo del bucle activo.

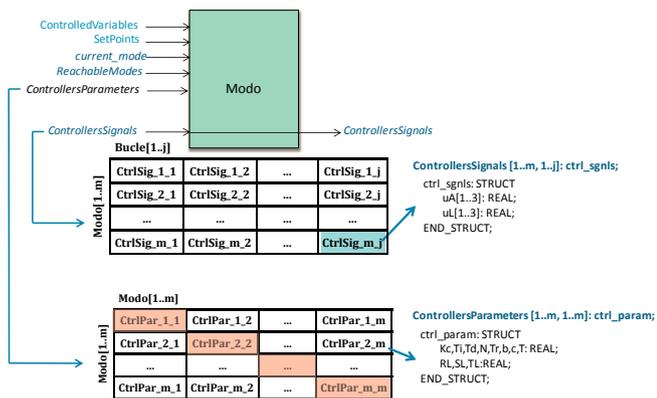


Figura 4: Interfaz del programa de modo con mecanismo de seguimiento

La Figura 4 muestra el interfaz del programa de modo con mecanismo de seguimiento, que ahora debe ejecutar el algoritmo básico y los algoritmos de seguimiento de todos sus alcanzables. Para poder implementar esta nueva funcionalidad, se han definido nuevas variables en su interfaz. Por un lado las variables de entrada *current_mode* y *ReachableModes*, necesarias para identificar el modo en curso y sus modos alcanzables. Por otro

lado, la variable de entrada y salida *ControllersSignals* permite a los controladores latentes que pasan a ser activos así como a los controladores activos que pasan a ser latentes disponer de las salidas calculadas por sus respectivos algoritmos en los instantes anteriores a la conmutación.

5. Casos de estudio

Este apartado presenta dos casos de estudio que ilustran los dos aspectos relevantes de la propuesta de supervisor: el diseño de los planes estáticos de los modos y la mejora que se obtiene con el mecanismo BT.

El primero, un sistema de dos tanques con conexiones a diferentes alturas para su acoplamiento, permite ilustrar el método de diseño de la arquitectura de supervisión y control presentado en el apartado 3. El sistema de tanques ha sido definido como un proceso con conmutación de modos porque su dinámica continua queda descrita mediante diferentes conjuntos de ecuaciones diferenciales en función del grado de acoplamiento entre tanques. Está formado por dos bucles y un prototipo simulado del mismo permite configurar diferentes estructuras de tanques con objeto de obtener modos de operación con muy diferentes dinámicas de operación, de forma que los requisitos temporales de los bucles también varíen.

El segundo caso de estudio es un sistema en el que se pretende mantener diferentes demandas de caudal y temperatura del agua contenida en un depósito. La dinámica de la temperatura es muy dependiente de la demanda de caudal por lo que se han definido modos de operación que abarcan distintos rangos de caudal (véase Figura 14). Este sistema permitirá mostrar la problemática del salto en la señal de control debido a la conmutación e ilustrar la mejora que se advierte en el transitorio de la conmutación al utilizar la arquitectura de supervisión diseñada, mejora que se consigue tanto con la propia arquitectura multi-modo como por el mecanismo BT que se ha añadido.

5.1 Sistema de dos tanques

El sistema está formado por dos tanques acoplados mediante dos tuberías de conexión a diferentes alturas (Figura 5). Los tanques tienen un orificio de descarga cuyo caudal se fija mediante una válvula manual. El grado de acoplamiento, definido por las conexiones, también puede fijarse mediante válvulas manuales. Además, cada tanque tiene su entrada de alimentación por la parte superior, regulada mediante una bomba.

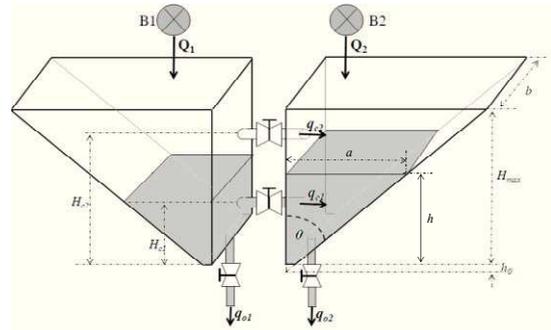


Figura 5: Tanques con geometría trapezoidal

$$\dot{V}_1 = Q_1 - q_{e1} - q_{e2} - q_{o1}$$

$$\dot{V}_2 = Q_2 + q_{e1} + q_{e2} - q_{o2}$$

$$V = \frac{1}{2}ahb - \frac{1}{2}a_0h_0b = \frac{1}{2}btg\theta(h^2 - h_0^2) \approx \frac{1}{2}bh^2tg\theta \tag{11}$$

$$q_{o1} = az_1S_{o1}\sqrt{2gh_1}$$

$$q_{o2} = az_2S_{o2}\sqrt{2gh_2}$$

Tabla 1: Invariantes y dinámica continua propias de cada modo

Modo	Invariante	Dinámica continua específica	
		q _{c1}	q _{c2}
m ₁	(x ₁ ≤ H _{c1}) ∧ (x ₂ ≤ H _{c1})	q _{c1} = 0	q _{c2} = 0
m ₂	(H _{c1} < x ₁ ≤ H _{c2}) ∧ (x ₂ ≤ H _{c1})	q _{c1} = K _{c1} √(h ₁ - H _{c1})	q _{c2} = 0
m ₃	(x ₁ ≤ H _{c1}) ∧ (H _{c1} < x ₂ ≤ H _{c2})	q _{c1} = -K _{c1} √(h ₂ - H _{c1})	q _{c2} = 0
m ₄	(H _{c1} < x ₁ ≤ H _{c2}) ∧ (H _{c1} < x ₂ ≤ H _{c2})	q _{c1} = K _{c1} sgn(h ₁ - h ₂)√(h ₁ - h ₂)	q _{c2} = 0
m ₅	(x ₁ > H _{c2}) ∧ (H _{c1} < x ₂ ≤ H _{c2})	q _{c1} = K _{c1} √(h ₁ - h ₂)	q _{c2} = K _{c2} √(h ₁ - H _{c2})
m ₆	(H _{c1} < x ₁ ≤ H _{c2}) ∧ (x ₂ > H _{c2})	q _{c1} = -K _{c1} √(h ₂ - h ₁)	q _{c2} = -K _{c2} √(h ₂ - H _{c2})
m ₇	(x ₁ > H _{c2}) ∧ (x ₂ > H _{c2})	q _{c1} = K _{c1} sgn(h ₁ - h ₂)√(h ₁ - h ₂)	q _{c2} = K _{c2} sgn(h ₁ - h ₂)√(h ₁ - h ₂)
m ₈	(x ₁ > H _{c2}) ∧ (x ₂ ≤ H _{c1})	q _{c1} = K _{c1} √(h ₁ - H _{c1})	q _{c2} = K _{c2} √(h ₁ - H _{c2})
m ₉	(x ₁ ≤ H _{c1}) ∧ (x ₂ > H _{c2})	q _{c1} = -K _{c1} √(h ₂ - H _{c1})	q _{c2} = -K _{c2} √(h ₂ - H _{c2})

La dinámica continua viene descrita por el conjunto de ecuaciones en (11) y por las ecuaciones de los caudales a través de las conexiones, q_{c1} y q_{c2} (cm³/s), que dependen del acoplamiento alcanzado (ver Tabla 1).

El proceso por tanto opera en nueve modos de operación diferentes que corresponden a los ilustrados en la Tabla 1, cuyo comportamiento dinámico viene descrito por conjuntos de ecuaciones diferenciales diferentes. Por otro lado, la geometría de los tanques provoca una dinámica muy rápida a niveles bajos mientras que se ralentiza de forma significativa a niveles altos.

La Tabla 2 muestra los valores dados a los parámetros constitutivos del sistema para las experiencias que se presentan.

El objetivo es controlar los niveles de los dos tanques utilizando realimentación simple mediante controlador PID. Por lo tanto, son dos los bucles de control, siendo, en ambos casos, la variable controlada el nivel y la variable manipulada la señal a la bomba.

Tabla 2: Parámetros constitutivos del sistema de tanques

Parámetro	Valor	Significado
g	981 (cm/s ²)	gravedad
H _{max}	100 (cm)	altura máxima
H _{c1}	20 (cm)	altura conexión 1
H _{c2}	60 (cm)	altura conexión 2
a	10 (cm)	fondo
θ	65°	ángulo
S _o	1 (cm ²)	sección de descarga
S _{c1}	1 (cm ²)	sección conexión
T ₁ az _o	0,5	coef. de descarga tanque 1
T ₂ az _o	0,5	coef. de descarga tanque 2
az _{c1}	0,5	coef. de flujo por conexión 1
az _{c2}	0,7	coef. de flujo por conexión 2
Lc ₁	10 (cm)	longitud conexión 1
Lc ₂	10 (cm)	longitud conexión 1
Q _{1max}	400 (cm ³)	caudal máximo entrada 1
Q _{2max}	400 (cm ³)	caudal máximo entrada 2

La sintonía de los controladores se ha llevado a cabo de forma que se cumplan ciertas especificaciones de respuesta. Concretamente, error nulo a escalón en la consigna de nivel,

sobreimpulso que no debe superar el 12% y un tiempo de establecimiento inferior a 120 s. Lo que ha dado lugar a dos sintonías diferentes, el controlador PI2 cuando el sistema opera en la zona estrecha de los tanques, y el controlador PI1 cuando opera en la zona ancha que se caracteriza por una dinámica más lenta. La Tabla 3 muestra la asignación de controladores de bucle a cada modo del proceso (nótese que entre los dos controladores cumplen las especificaciones exigidas en los 9 modos). De esta asignación de algoritmos de control a modos se deriva fácilmente los modos del supervisor que son los cuatro que aparecen en la última fila de la Tabla 3. Por otro lado, los parámetros de los distintos controladores se representan en la Tabla 4.

Tabla 3: Controladores de bucle por modo

Modo Proceso	q ₁	q ₂	q ₃	q ₄	q ₅	q ₆	q ₇	q ₈	q ₉
Bucle1	PI ₂	PI ₁	PI ₂	PI ₁	PI ₂				
Bucle2	PI ₂	PI ₂	PI ₁	PI ₂	PI ₁				
Modo Supervisión	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄				M ₂	M ₃

Tabla 4: Parámetros y requisitos temporales (tiempo en segundos)

	PI ₁	PI ₂
K _c	6	1.5
T _i	60	15
T _r	50	10
T	5	2
D	4	2
C	0.2	0.2

Dado que los periodos de muestreo de ambos controladores son diferentes, se diseña un ejecutivo cíclico por modo con objeto de planificar la ejecución temporal de los algoritmos de control.

Tabla 5: Parámetros de los ejecutivos cíclicos (tiempo en segundos)

	T _M	T _S	k ⁱ
M ₁	2	2	1
M ₂	10	2	5
M ₃	10	2	5
M ₄	5	5	1

Los valores del hiper-periodo y del ciclo secundario calculados así como el número de ciclos secundario en cada marco principal, se muestran en la Tabla 5.

A continuación se realiza la asignación de activaciones de los distintos algoritmos al marco secundario correspondiente.

$$\Lambda = \{\Lambda^1, \Lambda^2, \Lambda^3, \Lambda^4\} = \{ \{CA_{11}^1, CA_{21}^1\}, \{CA_{21}^2, CA_{41}^2\}, \{CA_{22}^2\}, \{CA_{23}^2\}, \{CA_{24}^2, CA_{42}^2\}, \{CA_{25}^2\}, \{CA_{41}^3, CA_{21}^3\}, \{CA_{42}^3\}, \{CA_{43}^3\}, \{CA_{44}^3, CA_{22}^3\}, \{CA_{45}^3\}, \{CA_{41}^4, CA_{21}^4\} \} \tag{12}$$

CA_{jn}ⁱ: n-ésima activación del algoritmo de bucle j en modo i.

En los modos 1 y 4, dado que los requisitos temporales de ambos bucles son idénticos, ambos algoritmos deberán activarse en todos los ciclos secundarios.

El ejecutivo cíclico del modo M₂, que es simétrico al del modo M₃, se muestra en la Figura 6. En ella puede observarse que el plan estático es el mismo con o sin BT. La diferencia radica en que al incorporar la estrategia de seguimiento, cuando se activa un algoritmo, también se ejecutan sus latentes correspondientes (véase Figura 6), alargándose con ello el tiempo de cómputo total del algoritmo.

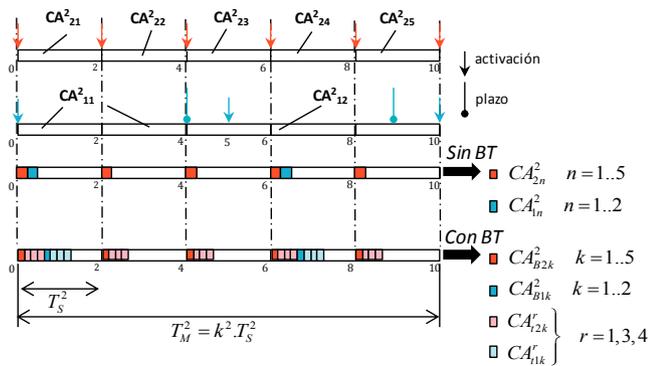


Figura 6: Cronograma de activaciones de algoritmos en el modo 2

Para evaluar la eficacia de la supervisión, se han utilizado trayectorias para las consignas de nivel, haciéndolos evolucionar a lo largo de distintos modos de acoplamiento. La experiencia se ha repetido varias veces, cada vez utilizando los algoritmos de control asociados a un modo distinto, y una última utilizando la arquitectura diseñada.

Las gráficas que se presentan a continuación muestran la evolución de los niveles en seguimiento a una de las trayectorias que hace que el proceso recorra los modos q₁, q₂, q₄ y q₅. Cada una de las gráficas muestra un tramo ya que la experiencia completa dura 6 horas. Hay que tener en cuenta que el modo M₄ del supervisor abarca desde la primera conexión entre los tanques (20 cm) hasta la parte superior de los mismos (100 cm), y que los modos M₁, M₂ y M₃ representan la operación del sistema cuando el nivel de alguno de los tanques se encuentra en la zona estrecha de los mismos.

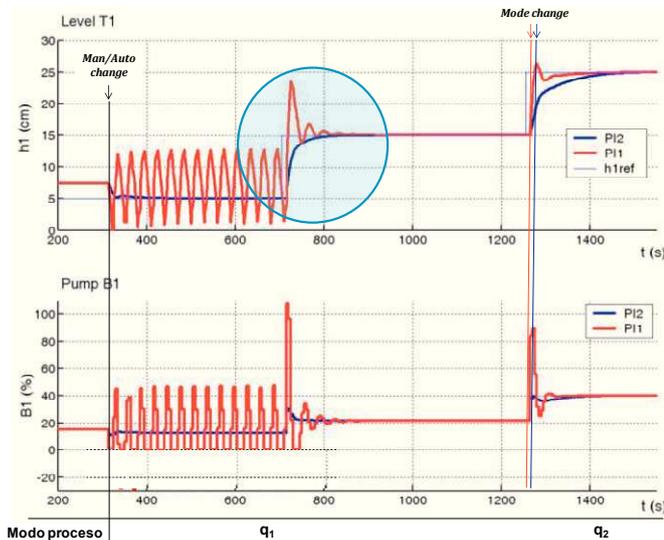


Figura 7: Operación en zona estrecha con único controlador

La Figura 7 muestra el nivel h₁ y la señal de control a su correspondiente bomba en el tramo de la trayectoria en el que el nivel se encuentra en la zona estrecha de los tanques. Es decir, por debajo del primer acoplamiento y por encima hasta los 25cm. Se observa que el algoritmo de control PI₁ correspondiente a M₄, especialmente sintonizado para trabajar en la zona ancha, provoca una respuesta inaceptable en la zona estrecha. Nótese, además, que medida que el nivel sube la oscilación disminuye.

En la Figura 8 se observa, por el contrario, que en la zona superior del tanque, el controlador adecuado que cumple especificaciones es el PI₁, que responde más rápido que el PI₂, que va ralentizando la respuesta a medida que el nivel sube.

La Figura 9 muestra, en detalle y a la misma escala, el nivel h₁ en las zonas resaltadas de la Figura 7 y de la Figura 8. En ella se puede apreciar la rapidez y la lentitud con la que responde el sistema operando en la zona ancha o estrecha del tanque con cada uno de los controladores.

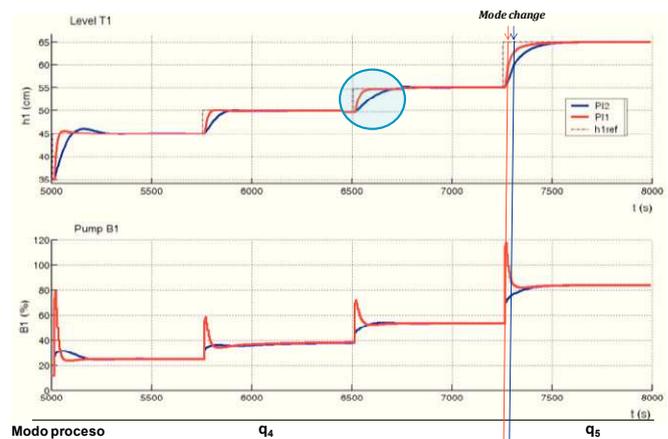


Figura 8: Operación en zona ancha con único controlador

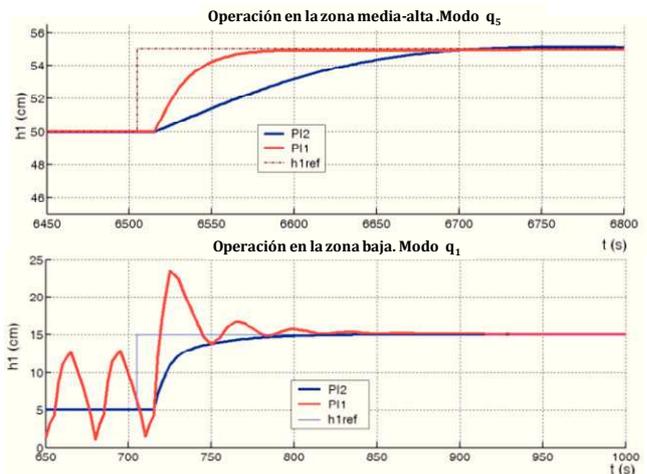


Figura 9: Detalles de operación en zona ancha y zona estrecha

Las gráficas de la Figura 10 corresponden a la evolución del nivel h₁ y su correspondiente señal de bomba, mostradas en la Figura 7 a las que se ha añadido la respuesta obtenida utilizando la arquitectura de conmutación (en negro). En el instante en que alcanza la primera conexión (20 cm), cambia el modo y se conmuta de controlador PI₂ a PI₁. Esto provoca que la acción de control pase a cuadruplicar la componente proporcional en

detrimento de una acción integral que pasa a reducirse a un cuarto del valor que tenía. Dado que el proceso pasa a operar en un modo con una dinámica más lenta, se produce, de forma natural, una transición suave del control, como se puede apreciar en la gráfica de la Figura 11, en la que se muestra una ampliación del nivel h_2 en el instante en que se conmuta el controlador al detectarse el cambio de modo M_2 a M_4 .

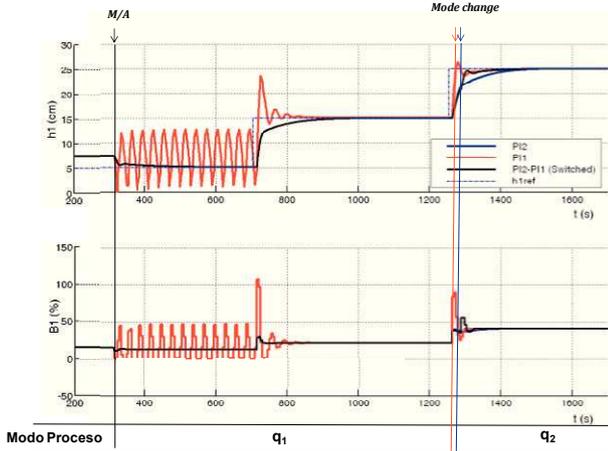


Figura 10: Comparativa con y sin conmutación operando en zona estrecha

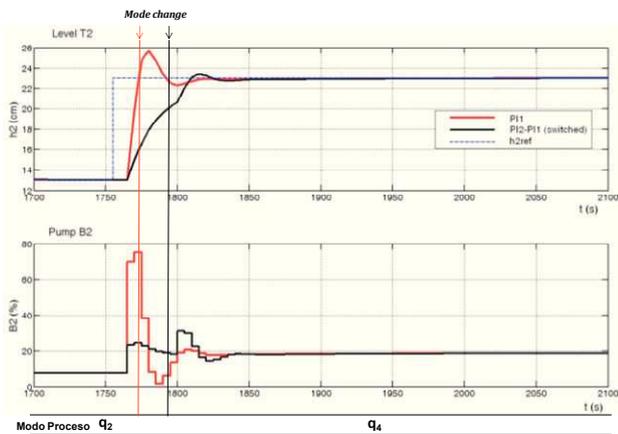


Figura 11: Conmutación de modo M_2 a M_4 → Cambio de PI_2 a PI_1 .

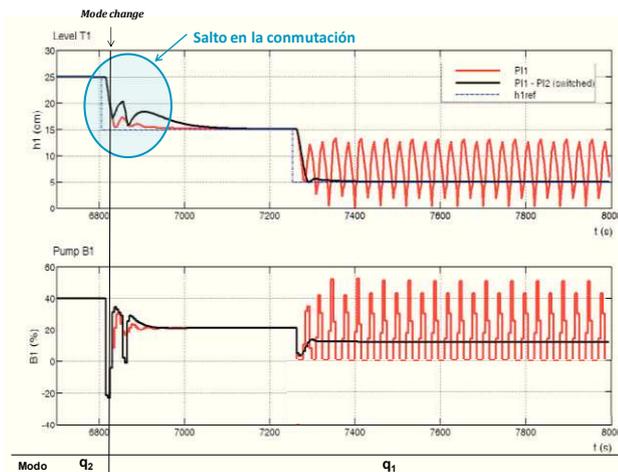


Figura 12: Conmutación de modo M_2 a M_1 → Cambio de PI_1 a PI_2 .

En la Figura 12 muestra la evolución descendente de h_1 en la zona estrecha. En esta conmutación, se pasa de PI_1 al controlador PI_2 , en que la acción proporcional se ve reducida a un cuarto de su valor anterior, mientras que la acción integral cuadruplica su efecto, sin que este nuevo controlador tenga información sobre la evolución previa del sistema. Dado que la dinámica del proceso se hace más rápida en esta zona, aparece un salto en la conmutación. Operando ya en la zona estrecha, se observa la mejora obtenida con la arquitectura de conmutación.

El análisis comparativo de las alternativas de control realizado mediante la evaluación del índice ISE del error (Integral del cuadrado del error) para la trayectoria definida, da el resultado que se muestra en la Figura 13. La respuesta con menor valor de los índices corresponde a la arquitectura de conmutación (*switched*). Los índices correspondientes a los controladores que operan el modo M_4 y al sistema conmutado tienen un valor muy próximo, pero el índice correspondiente a los controladores del M_4 no refleja la inestabilidad de la respuesta cuando el nivel trabaja en la zona estrecha.

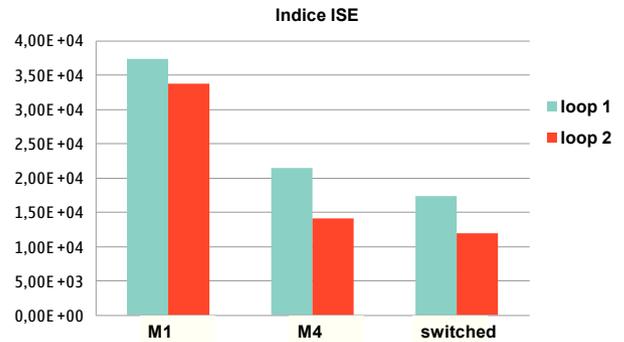


Figura 13: Resultado del análisis comparativo mediante ISE

5.2 Demanda de temperatura y caudal

El segundo proceso consiste en un tanque agitado en el que el objetivo es proporcionar un fluido a la temperatura y caudal demandados. El caudal se controla manipulando la válvula de entrada de F_e , mientras el control de temperatura se realiza manipulando la válvula de caudal de fluido de calentamiento F_v , tal y como puede verse en la Figura 14. Tanto el depósito como la tubería están aislados térmicamente. La dinámica de la temperatura en el punto de medida T , queda representada en la ecuación (13), donde se observa que tanto la constante de tiempo como la ganancia del proceso y el retardo de medida dependen del valor del caudal.

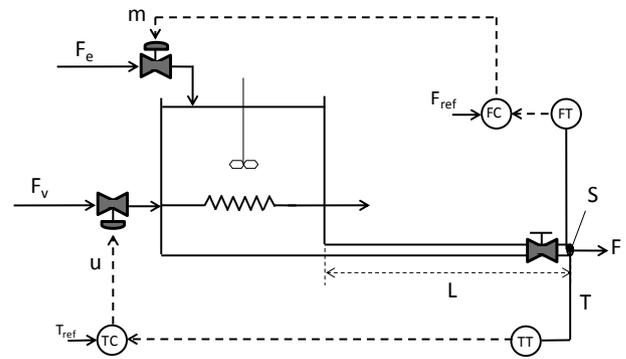


Figura 14: Control de caudal y temperatura

$$T(s) = \frac{(T_{e0} - T_0) / F_{e0}}{A\alpha F_{e0}s + 1} e^{-Ls/F_e} F_e(s) + \frac{V/cpF_{e0}}{A\alpha F_{e0}s + 1} e^{-Ls/F_e} Q(s) \quad (13)$$

La Tabla 6 contiene los valores dados a los parámetros del sistema.

Tabla 6: Parámetros constitutivos del sistema de temperatura y caudal

Parámetro	Valor	Significado
<i>h</i>	0,6 (m)	altura depósito
<i>A</i>	0,2 (m)	sección transversal
<i>L</i>	3 (m)	longitud tubería
<i>S</i>	0,009 (m ²)	sección tubería
ρ	1000 (Kg/m ³)	densidad (agua)
<i>C</i>	502320 (J/K)	capacidad calorífica
<i>cf</i>	4186 (J/Kg.K)	calor específico (agua)
<i>T_{e0}</i>	15 (°C)	temperatura ambiental
<i>T_o</i>	38 (°C)	temperatura entrada
<i>F_{o1}</i>	0,03 (m ³ /min)	caudal nominal en PO ₁
<i>F_{o2}</i>	0,01 (m ³ /min)	caudal nominal en PO ₂
<i>F_{o3}</i>	0,06 (m ³ /min)	caudal nominal en PO ₃

Si se desea que la respuesta del sistema realimentado no tenga error a cambios constantes en la consigna así como una respuesta transitoria que tenga un sobre-impulso menor del 5% y tiempo de establecimiento $t_s < 10$ s para el bucle de caudal, se puede sintonizar un único controlador tipo PID que da respuesta satisfactoria en todo el rango de operación. Sin embargo, en el caso del bucle de temperatura, no ha sido posible sintonizar un único controlador para el que la temperatura exhiba un comportamiento aceptable en todo el rango de operación. Ello es debido a que las dinámicas dependen fuertemente del caudal demandado, cuyo rango de variación es amplio. Se han realizado un conjunto de experimentos que han permitido determinar tres rangos del caudal demandado en el que la dinámica es tan diferente que pueden considerarse tres modos de operación distintos. Nótese que es necesario llegar a un compromiso en el número de modos a considerar, ya que un número excesivo aumenta la complejidad del diseño e introduce mayor sobrecarga en el supervisor mientras que un número excesivamente pequeño podría llevar a que aunque se limite, no se elimine la problemática estudiada. Por ello, ha sido necesario definir modos de operación en función del caudal y sintonizar valores diferentes de los parámetros del controlador en cada modo para cumplir especificaciones de sobre-impulso menor del 5% y tiempo de establecimiento $t_s \sim 150$ s, además de un seguimiento sin error a cambios escalón en la consigna de temperatura.

Tabla 7: Parámetros básicos

Parámetro	PI ₁	PI ₂	PI ₃
<i>K_c</i>	1.5	0.4	2.0
<i>T_i</i> (min)	4.1	3.2	1.3
<i>T_d</i> (min)	0	0	0
<i>T_r</i> (min)	4.0	3.1	1.2
<i>N</i>	20	20	20
<i>b</i>	1	1	1
<i>c</i>	0	0	0
<i>R_L</i>	0.004	0.05	0.07
<i>T</i>	0.3	0.45	0.15
<i>D</i>	0.3	0.45	0.15
<i>C</i>	0.025	0.025	0.025

La Tabla 7 muestra los distintos valores de sintonía de los parámetros del controlador obtenidos en los tres rangos de operación distintos del caudal. Estos rangos se corresponden con los modos de operación del proceso, y han sido seleccionados y asignados controladores a los mismos de forma que se cumplan las especificaciones en todos ellos (véase Tabla 8).

Tabla 8: Asignación de controladores de bucle en cada modo

Modo Proceso	rango de F (m ³ /min)	Bucle de T	Bucle de F
q ₁	0.02÷0.05	PID ₁	PID ₄
q ₂	0.01÷0.02	PID ₂	PID ₄
q ₃	0.05÷0.09	PID ₃	PID ₄

El controlador de bucle de nivel es el mismo en todo el rango de operación del caudal, y tiene un periodo de muestreo de 0.15 minutos.

El modo del supervisor queda por tanto definido por el conjunto de controladores que opera en ese modo y el rango de caudal en el que es válido.

Por cada modo se ha diseñado un ejecutivo cíclico que únicamente depende de los periodos de muestreo de los bucles. Los parámetros que definen dichos ejecutivos cíclicos están expresados en la Tabla 9 (unidad de tiempo = minutos).

Tabla 9: Parámetros de los ejecutivos cíclicos en cada modo

	T _M	T _S	k ^l
M ₁	0.3	0.15	2
M ₂	0.45	0.15	3
M ₃	0.15	0.15	1

Para la evaluación de la eficacia supervisión se ha diseñado una trayectoria de evolución del caudal demandado que recorre los modos en la secuencia q₁→q₂→q₁→q₃→q₁.

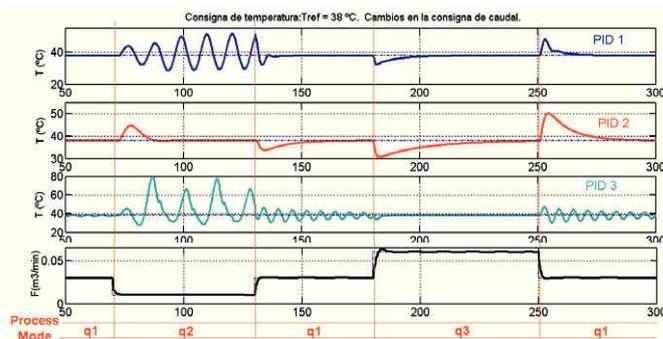


Figura 15: Evolución de la temperatura a cambios de consigna de caudal con único controlador

En la Figura 15 puede observarse que al utilizar un único controlador en todos los modos, en algunos la temperatura oscila e incluso se desestabiliza el bucle.

La Figura 16 muestra como la utilización de un esquema con controlador único sólo es adecuado cuando se trabaja en el rango para el que ha sido diseñado, mientras que la arquitectura multi-modo permite ampliar el rango de operación del sistema. No obstante, se aprecian transitorios derivados de la conmutación del control, que en algunos casos son más pronunciados, y que pueden ser reducidos utilizando el supervisor BT.

Los resultados de la Figura 17 muestran la reducción que se consigue en el salto derivado de la conmutación en cualquiera de las conmutaciones de modo producidas cuando se utiliza el supervisor BT.

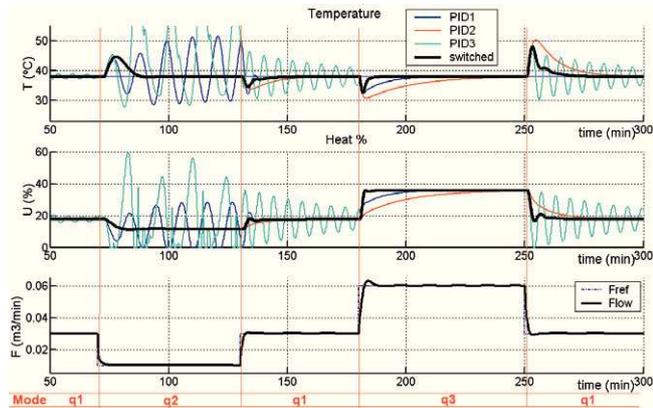


Figura 16: Temperatura a cambios en la demanda de caudal. Comparativa con y sin supervisión.

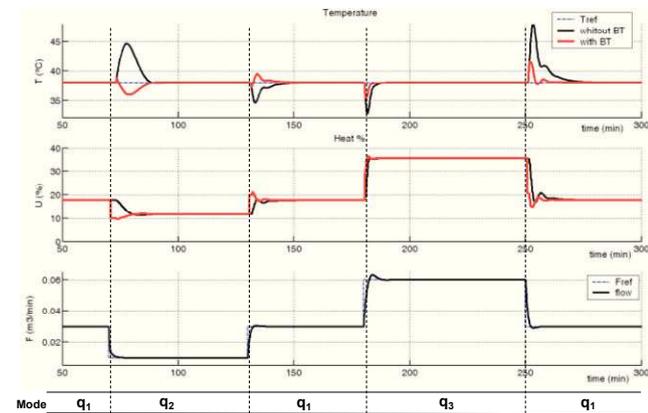


Figura 17: Saltos en las conmutaciones. Comparativa con y sin BT.

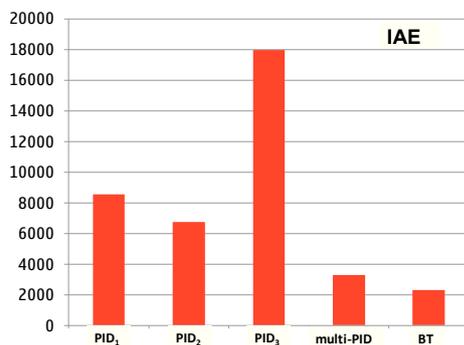


Figura 18: Análisis mediante índice IAE. Mejoras debidas a la arquitectura multi-modo y al BT

El análisis comparativo de las alternativas de control realizado mediante la evaluación del índice IAE (Integral del valor absoluto del error) para la trayectoria definida, da el resultado que se muestra en la Figura 18.

Como se observa, los mejores índices corresponden en ambos casos al sistema con arquitectura multi-modo. El índice también resalta la mejora del transitorio de la conmutación al utilizar la estrategia de seguimiento BT.

6. Conclusión

En este trabajo, se ha mostrado las ventajas de utilizar una arquitectura multi-bucle y multi-modo en procesos que presentan dinámicas híbridas y para los que no es posible encontrar un conjunto de controladores que ofrezcan buenas prestaciones en todo el rango de operación. La principal contribución se basa en un esquema de seguimiento optimizado para evitar saltos en las acciones de control en los instantes de conmutación así como un método de diseño de una arquitectura de supervisión y control de procesos con conmutación de modos.

El supervisor detecta cambios de modo del proceso que impliquen cambios del conjunto de algoritmos de control, y conmuta el control del proceso al nuevo conjunto de algoritmos.

Se ha mostrado como una planificación conducida por tiempo puede ser adecuada para diseñar esta arquitectura siempre y cuando la diferencia entre los periodos de bucle no sea muy grande, y será más simple cuando más armónicos sean.

Con el propósito de mejorar transitorios inaceptables derivados de la conmutación de las señales de control, se ha introducido en la arquitectura un mecanismo BT, basado en un esquema de seguimiento, mediante el cual los controladores ejecutan un algoritmo diferente en función de su condición, activo o latente.

Esta estructura adicional implica una sobrecarga de cómputo dado que, por cada algoritmo de modo activo que se ejecute, lo harán otros tantos como modos alcanzables desde el activo haya.

Para disminuir la complejidad de diseño de planificadores globales que tengan en cuenta todos los algoritmos latentes de los algoritmos de modo activo, los latentes se ejecutarán con el periodo de muestreo del activo correspondiente.

La limitación de la aplicación del método depende del número de modos y de las posibles transiciones, ya que aumenta la sobrecarga de planificación y seguimiento. Aunque la experiencia demuestra que es posible encontrar un número de modos bajo en el que diseñar estrategias de control.

La implementación de la arquitectura propuesta en el estándar IEC61131-3 se ha conseguido mediante la estructuración de los modos y el supervisor en unidades de código separadas, de forma que la detección de modo es una ejecución cíclica y el plan estático que planifica la ejecución periódica de los múltiples lazos se programa en los modos. El módulo supervisor puede ser codificado en lenguaje ST o SFC dado que implementa un diagrama de estados.

English Summary

A multi-controller with bumpless transfer architecture for industrial switched-mode processes

Abstract

Switched mode systems are defined as those represented by a finite set of linear subsystems and a set of logic rules orchestrating the switching among them. A set of dynamic subsystems together with a logical system that orchestrates the switching among them could be used in order to describe it. An alternative to control them is a supervisory multi-mode controller architecture that allows to meeting multiple control objectives. But switching can consequently derived in bumps or undesirable

transient responses. This type of problem is commonly encountered in several industrial application fields, where the Programmable Logic Controller (PLCs) is the most used technology. This paper describes a methodology for the design and the implementation of Bumpless Transfer (BT) mechanisms within multi-rate control architecture for switched mode systems, to be implemented in PLC following the IEC 61131-3 standard. The BT strategy is based on to make controllers which are candidate to switch track to active controllers. By detecting the system state and the feasible next states, the supervisor decides the way in which the different controllers of the architecture execute. The steps to design the complete architecture are presented and experimental results that validate the architecture are shown.

Keywords:

Switched-mode systems, supervision, time-driven scheduling, Bumpless Transfer, IEC 61131-3 standard.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por MCYT y FEDER a través de los proyectos DPI2012-37806-C02-01, UPV/EHU GIU 10/20 y UFI11/28.

Referencias

- Åström, K.J., Wittenmark, B., 1990. Computer controlled systems: Theory and Design. 2nd ed., Prentice Hall, New Jersey, Ch. 15, pp. 464–465.
- Bengea, S. C., DeCarlo, R. A., 2005. Optimal control of switching systems. *Automatica* 41, 11–27.
- Bhagwat, A., Srinivasan, R., Krishnaswamy, P. R., 2003. Multi-linear model-based fault detection during process transitions. *Chemical Engineering Science* 58, 1649–1670. DOI: 10.1016/S0009-2509(03)00008-3
- Downs, J.J., Vogel, E.F., 1993. A plant-wide industrial process control problem. *Computers & Chemical Engineering* 17(3), 245–255.
- Engell, S., Stursberg, O., 2005. Hybrid Control Techniques for the Design of Industrial Controllers. 44th IEEE Conference on Decision and Control, and 43th European Control Conference, 5612–5617.
- Fuente, M.J., Moya, E., Sainz Palmero G.I., 2007. Esquema de detección de fallos difuso basado en modelado lingüístico-preciso de un motor de inducción. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* 4(2), 72–80.
- Gómez, D., Ramírez, G., Ramírez, A., Ruíz, J., 2010. Observability of switched linear systems. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 6(2), 127–135.
- Graebe S.F., Ahlén, A., 1996a. Bumpless Transfer. *The Control Handbook*, Levine, W.S. (ed.), 381–388.
- Graebe, S.F., Ahlén, A.L.B., 1996b. Dynamic transfer among alternative controllers and its relation to antiwindup controller design. *IEEE Trans. Control Systems Technology* 4(1), 92–99.
- Hanus, R., Kinnaert, M., Henrotte, J.L., 1987. Conditioning Technique, a general Anti-windup and Bumpless Transfer Method. *Automatica* 23(6), 729–739.
- Henriques, J., Cardoso, A., Dourado, A., 1999. Supervision and c-Means clustering of PID controllers for a solar plant, *Int. Journal of Approximate Reasoning*, 22, 73–91.
- Hespanha, J. P., Liberzon, D., Morse, A. S., 2003. Overcoming the limitations of adaptive control by means of logic-based switching. *Systems & Control Letters* 49(1), 49–65.
- Hilhorst, R. A. Van Amerongen, J., Lohnberg, P., Tulleken, H. J. A. F., 1994. A supervisory control for mode-switch processes. *Automatica* 30(8), 1319–1331. ISSN 0005-1098
- International Electrotechnical Commission, 2003. IEC International Standard IEC 1131-3 Programmable Controllers, Part 3: Programming Languages.
- Iriondo, N., Marcos, M., Estévez, E., 2006. Implementing Non-Linear Strategies for PID in IEC 61131-3 ST Language. 15th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, pp. 969 – 972. DOI: 10.1109/ETFA.2006.355231
- Karl-Heinz, J., Tiegelkamp, M., 2001. IEC 61131-3: Programming Industrial Automation Systems. Springer. Ch. 2, pp. 47, Ch. 6, pp. 233–236.
- Kinnaert, M., Delwiche, T., Yamé, J., 2009. State Resetting for Bumpless Switching in Supervisory Control. European Control Conference ECC'2009, pp. 2097–2102.
- Lennartsson, B., Tittus, M., Egardt, B., Pettersson, S., 1996. Hybrid systems in process control. *Control Systems Magazine* 16(5), 45–56.
- Liberzon, D., 2003. Switching in systems and control. Birkhäuser, Boston. Ch. III, pp. 75–76.
- Lin, H., Antsaklis, P. J., 2009. Stability and stabilizability of switched linear systems: A survey of recent results. *IEEE Transactions on Automatic Control* 54(2), 308–322.
- Liu, J.W.S., 2000. Real-time Systems. Prentice Hall. Ch. 5, pp. 85–92, 103.
- Lourenço, J.M.A., Lemos, J.M., 2006. Learning in Switching Multiple Model Adaptive Control, *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine* 9(3), 24–29. DOI: 10.1109/MIM.2006.1637975
- Maestri, M., Cassanello, M., Horowitz, G., 2009. Kernel PCA performance in processes with multiple operation modes. *Chemical Product and Process Modeling* 4(5), Article 7. DOI: 10.2202/1934-2659.1383
- Marcos, M., Estévez, E., Pérez, F., van der Wal, E., 2009. XML exchange of control programs, *IEEE Industrial Electronics Magazine* 3, 32–35.
- Morse A. S., 1995. Control using logic-based switching. En: Isidori A. (Ed.), *Trends in Control*, Springer, New York, pp. 69–113.
- Morse A. S., 1996. Supervisory control of families of linear set-point controllers – Part 1: Exact machine. *IEEE Trans. On Automatic Control* 41(10), 69–113.
- Pasamontes, M., Álvarez, J.D., Guzmán, J.L., Berenguel, M., 2010. Bumpless switching in control – A comparative study. 15th IEEE Int. Conf. on Emerging Technologies and Factory Automation. DOI: 10.1109/ETFA.2010.5641266
- Pasamontes, M., Álvarez, J.D., Guzmán, J.L., Lemos, J.M., Berenguel, M., 2011. A switching control strategy applied to a solar collector field. *Control Engineering Practice* 19, 135–145.
- Peng, Y., Vrancic, D., Hanus, R., 1996. Anti-Windup, Bumpless, and Conditioned Transfer Techniques for PID Controllers. *IEEE Control Systems Magazine* 16(4), 48–57.
- PLCopen, 2003. <http://plcopen.org/>
- Ravindranathan, M., Leitch, R., 1999. Model switching in intelligent control systems. *Artificial Intelligence in Engineering* 13(2), pp. 175–187.
- Real, J. and Crespo, A., 2004. Mode Change Protocols for Real-Time Systems: A Survey and a New Proposal. *Real-Time Systems* 26(2), pp. 161–197.
- Rodrigues, M., Theilliol, D., Adam-Medina, M., Sauter, D., 2008. A fault detection and isolation scheme for industrial systems based on multiple operating modes. *Control Engineering Practice* 16, 225–239.
- Rodriguez, J. A., Romagnoli, J. A., Goodwin, G. C., 2003. Supervisory Multiple regime control, *Journal of Process Control* 13, 177–191.
- Sun, Z., Ge, S. S., 2005. Switched Linear Systems: Control and Design. Springer-Verlag, London.
- van der Wal, E., 2009. PLCopen, *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 3. DOI: 10.1109/MIE.2009.934799
- Yamé, J.J., Hanping, Q., 2010. Conditioned switching between two-degree-of-freedom controllers for plants with changing dynamics, 11th Int. Conf. Control, Automation, Robotics and Vision, pp. 945–951
- Zaccarian, L., Teel, A.R., 2005. The \mathcal{L}_2 (ℓ_2) Bumpless Transfer problem for linear plants: its definition and solution, *Automatica* 41, 1273–1280.
- Zambrano, D., Garcia-Gabin, W., Camacho, E.F., 2010. Application of a Transition Graph-based Predictive Algorithm to a Solar Air Conditioning Plant. *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 18(5), 1162–1171.
- Zamorano, J., Alonso, A. de la Puente, J. A., 1997. Building safety-critical real-time systems with reusable cyclic executives. *Control Engineering Practice* 5(7), 999–1005.
- Zhang, Y., Alleyne, A.G., Zheng, D., 2005. A hybrid control strategy for active vibration isolation with electrohydraulic actuators. *Control Engineering Practice* 13, 279–289.