

Recibido el 8 de enero de 2019, aceptado el 4 de febrero de 2019, fecha de publicación 14 de febrero de 2019, fecha de versión actual 7 de marzo de 2019.

Identificador de objeto digital 10.1109/ACCESS.2019.2899341

# Protocolo de consenso externo de redes

## Sistemas multiagente con comunicación

## Retrasos en los mecanismos activados por eventos

QI LEI<sup>1,5</sup>, JIA-HUI LI<sup>1</sup> , GUO-PING LIU<sup>2,3</sup> , (Miembro del IEEE), Y MIN WU<sup>4,5</sup> , (Miembro del IEEE)  
 de Ciencias de la Información e Ingeniería, Universidad Central del Sur, Changsha 410083, China 2  
 Facultad de Ingeniería, Universidad del Sur de Gales, Pontypridd CF37 1DL, Reino Unido  
 3. Centro CTGT, Instituto de Tecnología de Harbin, Harbin 150001, China.  
 4. Escuela de Automatización, Universidad de Geociencias de China, Wuhan 430074,  
 China. 5. Laboratorio Clave de Hubei de Control Avanzado y Automatización Inteligente para Sistemas Complejos, Wuhan  
 430074, China. Autor correspondiente: Jia-Hui Li (lijiahui@csu.edu.cn).

Este trabajo fue financiado en parte por la Fundación Nacional de Ciencias Naturales de China bajo la subvención 61573379, en parte por la Fundación Nacional de Ciencias Naturales de China bajo la subvención 61773144, en parte por la Fundación Provincial de Ciencias Naturales de Hubei de China bajo la subvención 2015CFA010, en parte por el Proyecto 111 bajo la subvención B17040, y en parte por los Fondos de Investigación Fundamental para las Universidades Centrales de la Universidad Central del Sur bajo la subvención 2018zzts553.

**RESUMEN** En este artículo, se analiza el problema del consenso externo para sistemas multiagente en red con retrasos en la comunicación bajo un mecanismo activado por eventos. La topología de comunicación entre agentes se caracteriza por un grafo no dirigido y conexo, y existen retrasos inducidos por la red durante las transmisiones de datos. Con base en ecuaciones recursivas, se propone una estrategia de predicción para compensar activamente los efectos de los retrasos inducidos por la red. Posteriormente, se introduce un mecanismo activado por eventos para evitar las actualizaciones de control continuas y la comunicación continua entre agentes. De acuerdo con la estrategia de predicción y el mecanismo activado por eventos descritos anteriormente, se propone un protocolo distribuido de control de consenso externo, mediante el cual se garantiza la estabilidad del sistema y se logra el consenso externo. Finalmente, se realiza una simulación numérica para ilustrar la validez del protocolo propuesto.

**TÉRMINOS DE ÍNDICE** Sistemas multiagente, retrasos inducidos por la red, consenso externo, mecanismo activado por eventos, estrategia de predicción.

### I. INTRODUCCIÓN

El problema del control cooperativo para sistemas multiagente en red (NMAS) se ha convertido en un tema de gran actualidad y sigue siendo un desafío en el campo del control [1]–[4]. El consenso para los NMAS significa que un grupo de subsistemas o agentes puede alcanzar un valor de consenso en una red compartida, según los requisitos. El valor de consenso puede ser cualquier magnitud física, como la temperatura, la velocidad y el nivel.

Algunos resultados de investigación significativos han demostrado la fiabilidad de los NMAS en su aplicación en diferentes campos [5]–[7], especialmente en sistemas de control de procesos, donde cada proceso puede considerarse un subsistema o un agente. En un protocolo de consenso promedio, el valor de consenso se calcula con base en el valor inicial de cada agente en los NMAS. Sin embargo, este tipo de protocolo de consenso solo puede limitarse a los NMAS con agentes de valor inicial distinto de cero. Además, a diferencia del protocolo promedio

El editor asociado que coordinó la revisión de este manuscrito y lo aprobó para su publicación fue Azwirman Gusrialdi.

Protocolo de consenso. El protocolo de consenso independiente del valor inicial de los agentes se denomina protocolo de consenso externo [8], [9]. El valor de consenso del protocolo de consenso externo se determina mediante las entradas de referencia externas proporcionadas a uno o más agentes. Es evidente que la entrada de referencia externa puede definirse como objetivo, por lo que el protocolo de consenso externo es adecuado para aplicaciones de NMAS en sistemas de control de procesos.

En los últimos años, se ha realizado un gran esfuerzo para ampliar los NMAS y lograr una implementación práctica más fiable. Por ejemplo, se estudió una estructura de modelo de sistema con mayor complejidad en lugar de un modelo de un solo integrador [10]. Se consideró una topología de comunicación dirigida o conmutada en lugar de un grafo no dirigido [11]. En sistemas prácticos, un problema que debe abordarse son los retardos inducidos por la red.

Los retrasos inducidos por la red son inevitables debido al ancho de banda limitado de las redes de comunicación y la velocidad de transmisión finita [12]–[15]. La existencia de retrasos inducidos por la red

Los retrasos pueden causar una degradación del rendimiento del sistema y Incluso la desestabilización. Para resolver este problema, se han desarrollado diversos métodos, como el control estocástico óptimo. método, método de control robusto, método de análisis de retardo de tiempo. Sin embargo, estos métodos suelen hacer algunas suposiciones estrictas sobre los sistemas relacionados [16]. Por otro lado, se ha demostrado que una estrategia de predicción es eficaz para compensar para el retraso inducido por la red activamente [17]–[19]. En [17], Se investiga el problema del consenso para sistemas multiagente en red no homogéneos con retardos constantes inducidos por la red. Basándose en ecuaciones recursivas, se desarrolla una nueva predicción. Se propone una estrategia que utiliza una función de transferencia para compensar los efectos de los retrasos inducidos por la red. En [18], una Se presenta un esquema de control predictivo multiagente en red permitir que los sistemas de control multiagente subyacentes con retrasos en la comunicación alcancen estabilidad y consenso en la salida. En [19], se presenta el análisis de estabilidad y el diseño de control de sistemas en red. sistemas de control predictivo multiagente mediante computación en la nube Se estudian. Se propone un esquema de control predictivo de nubes. para lograr el consenso y compensar los problemas inducidos por la red retrasos activamente.

Sin embargo, se necesitan actualizaciones de control continuas y comunicación continua entre los agentes entre los resultados. Como se mencionó anteriormente. Para los sistemas de control de procesos, el equipo es una característica importante. Actualizaciones de control continuas. y la comunicación continua entre los agentes provocará funcionamiento continuo del equipo, especialmente del actuador, lo que definitivamente conduce a pérdidas innecesarias del equipo. Para reducir aún más la frecuencia de las actualizaciones de control, tiempos de comunicación y costes computacionales innecesarios, Se desarrolla un mecanismo activado por eventos [20]–[27]. La idea principal de un mecanismo activado por eventos es que el control Las actualizaciones y la comunicación entre agentes se producen cuando se cumple una condición predefinida que desencadena un evento. Por ejemplo, El problema de consenso de sistemas multiagente bajo un controlador activado por eventos se estudia en [28], en el que un evento de Cada agente aparece solo cuando el error de medición del estado supera un umbral dado. En [29], se presenta un nuevo esquema de control distribuido, asíncrono e independiente activado por eventos para El problema del consenso de los sistemas multiagente con generalidades Se investiga la dinámica lineal. En [30], un controlador adaptativo distribuido basado en eventos y una nueva regla activada por eventos. Se idearon métodos con los que todos los agentes podrían converger en un pequeño conjunto acotado. Además, una forma de control de integración basada en En [31] y [32] se estudia un mecanismo desencadenado por eventos. en el que el control cuantificado y el control activado por eventos se integran para abordar el problema del consenso limitado de sistemas multiagente.

En las amplias aplicaciones de los NMAS en sistemas prácticos, Es necesario considerar los problemas inducidos por la red. retrasos y la pérdida de recursos. Hasta la fecha, solo unos pocos estudios... Se han realizado estudios sobre este tema [33]–[37]. Para el tiempo continuo sistemas, un control eficaz activado por eventos y robusto contra retardos En [34] se propone una estrategia basada en información local para Investigar el problema del consenso de agentes múltiples distribuidos sistemas. En [35], el problema del consenso con la comunicación

Los retrasos se gestionan mediante un protocolo activado por eventos y un Una nueva estrategia de transmisión de datos muestreados activada por eventos es presentado. Para sistemas multiagente de tiempo discreto, un distribuido Se propone un esquema de transmisión activado por eventos [36] garantizar que el sistema pueda alcanzar el consenso de forma asintótica. En [37] se adoptan leyes de control activadas por eventos para reducir la frecuencia de actualización de las actuaciones individuales según el Marco de datos muestreados para sistemas de tiempo discreto con tiempo retrasos. Es cierto que una estrategia de predicción tiene la capacidad de superar los efectos de retardo y que un mecanismo activado por eventos tiene la capacidad de evitar la pérdida innecesaria de recursos. Sin embargo, se ha prestado poca atención a la combinación de una estrategia de predicción con un mecanismo activado por eventos, que motiva el presente estudio.

En este artículo, nos centramos en el problema del consenso externo para los NMAS con retrasos en la comunicación bajo un Mecanismo activado por eventos. Inspirado por los resultados en [17], Se aplica una estrategia de predicción recursiva para compensar activamente los efectos de los retrasos inducidos por la red mientras que un Se introduce un mecanismo activado por eventos para evitar actualizaciones de control y comunicaciones continuas. Se propone un protocolo de consenso externo distribuido basado en una estrategia de predicción y un mecanismo activado por eventos para resolver el problema del consenso externo del sistema. bajo consideración. Las principales contribuciones se enumeran como Sigue:

- 1) Se consideran los retrasos inducidos por la red y Se aplica una estrategia de predicción recursiva para compensar para los efectos de los retrasos inducidos por la red de forma activa;
- 2) Se diseña un mecanismo activado por eventos considerando información sobre agentes con compensación de retardo;
- 3) Con el mecanismo propuesto de activación por eventos, actualizaciones de control continuas y comunicación entre agentes. se evitan; y
- 4) El protocolo de consenso externo distribuido propuesto Puede garantizar la estabilidad y el consenso de las partes relacionadas. sistemas.

En el resto del documento, la Sección II presenta algunas Conceptos básicos de la teoría de grafos algebraicos y plantea el problema a abordar. El método clave para resolverlo. se presenta en la Sección III. En la Sección IV, el análisis del sistema Se realiza la estabilidad y el consenso. La sección V demuestra La validez de los resultados propuestos se basa en ejemplos numéricos. Se extrae una breve conclusión y se presentan algunos trabajos futuros. que se da en la Sección VI.

## II. PRELIMINARES Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La teoría de grafos algebraicos se utiliza comúnmente en el estudio NMAS. Supongamos que un NMAS contiene  $n$  agentes. Entonces, La estructura topológica del sistema se puede describir como un gráfico  $G = (V, E, A)$ , donde  $V = \{1, 2, \dots, n\}$  es el conjunto de nodos y  $E = \{(i, j) : i, j \in V\}$   $V \times V$  es el conjunto de aristas.

El símbolo  $A = [a_{ij}]_{n \times n}$  representa la matriz de adyacencia, donde  $a_{ij} > 0$  si hay una conexión entre el nodo  $i$  y  $j$ ; de lo contrario,  $a_{ij} = 0$ . El conjunto de vecinos del agente  $i$  se denota como  $N_i = \{j \in V : (i, j) \in E, i \neq j\}$ . La matriz laplaciana de

$$u_i(t) = \begin{aligned} & G_i(q^{-1}) R(t) - y_i(t) - K_i (y_i(t - \tau) - y_j(t - \tau)), \quad j \in N_i \quad y_o \in F \\ & - G_i(q^{-1}) A_j (y_i(t - \tau) - y_j(t - \tau)), \quad y_o \in Q \end{aligned} \quad (4)$$

El grafo  $G$  puede ser dado por  $L = [l_{ij}]_{n \times n}$ , donde

$$l_{ij} = \begin{cases} a_{ij}, & y_o = j \\ -a_{ij}, & y_o = j. \end{cases} \quad (1)$$

Obviamente, para un grafo conexo y no dirigido  $G$ , la suma de filas de  $L$  es igual a cero, y  $L$  es semidefinida positiva, es decir,  $L = L^T \geq 0$ . Además,  $L$  tiene un valor propio cero  $\lambda_1 = 0$ , y el segundo valor propio más pequeño satisface  $\lambda_2 > 0$ .

Por tanto, los valores propios de la matriz  $L$  se pueden reordenar como  $0 = \lambda_1 < \lambda_2 \leq \dots \leq \lambda_n$ .

Consideremos un NMAS con  $n$  agentes SISO, donde la dinámica de cada agente se puede describir mediante el siguiente modelo de series de tiempo:

$$\begin{aligned} O_h(q^{-1}) y_i(t+1) &= B_i(q^{-1}) u_i(t), \quad i = 1, 2, \dots, n \\ O_h(q^{-1}) &= 1 + a_{i1}q^{-1} + \dots + a_{in_i}q^{-n_i} \\ B_i(q^{-1}) &= b_{i0} + b_{i1}q^{-1} + \dots + b_{in_{bi}}q^{-n_{bi}} \end{aligned} \quad (2)$$

donde  $n_{yi}$  y  $n_{ui}$  son los órdenes del polinomio  $A_i(q^{-1}) B_i(q^{-1})$  de entrada del agente  $i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , respectivamente;  $y_i(t)$  y  $u_i(t)$  son la salida y el control,  $b_{in_{bi}}$  es el respectivamente;  $a_{i1}, \dots, a_{in_i}$  son coeficientes del modelo; y el  $b_{i0}, \dots, b_{in_{bi}}$  retardo operador  $q^{-1}$  unitario.

Para permitir que el sistema logre estabilidad y alcance los objetivos deseados, cada agente necesita tener su propio controlador local, el cual está diseñado de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} T_u(q^{-1}) u_i(t+1) &= D_i(q^{-1}) e_i(t), \quad i = 1, 2, \dots, n \\ T_u(q^{-1}) &= 1 + c_{i1}q^{-1} + \dots + c_{in_{ci}}q^{-n_{ci}} \\ E_n(q^{-1}) &= d_{i0} + d_{i1}q^{-1} + \dots + d_{in_{di}}q^{-n_{di}} \end{aligned} \quad (3)$$

donde  $n_{ci}$  y  $n_{di}$  son los órdenes del polinomio  $C_i(q)$  y  $D_i(q)$ ,  $c_{i1}, \dots, c_{in_{ci}}$  y  $d_{i0}, \dots, d_{in_{di}}$  son los coeficientes del modelo;  $e_i(t)$  dona la señal de entrada del controlador local. Sea  $G_i(q)$  el controlador (3) está diseñado para alcanzar el rendimiento deseado de los  $-1$ ) =  $D_i(q^{-1})/C_i(q^{-1})$ . El local NMAS sin retrasos inducidos por la red. Afortunadamente, se pueden utilizar algunos métodos de control clásicos o avanzados para diseñar estos controladores locales.

Supuesto 1: El gráfico  $G$  es conexo y no dirigido.

Todos los bordes tienen una matriz de adyacencia positiva no ponderada y no se permite ningún bucle propio.

Supuesto 2: El retraso inducido por la red  $\tau$  es una constante y un entero positivo conocido correspondiente a cada arista.

De [17] se puede encontrar que el protocolo de consenso externo para un NMAS con un retardo inducido por la red constante  $\tau$  mientras que no se puede realizar ninguna compensación de retardo inducido por la red

descrito por (4), como se muestra en la parte superior de esta página, donde  $G_i(q^{-1})$  denota el controlador local;  $K_i$  es la ganancia positiva;  $G_i(q^{-1}) R(t)$  es la entrada de referencia externa;  $F$  es el conjunto de agentes con entrada de referencia;  $Q$  es el conjunto de agentes sin entrada de referencia;  $y_i(t - \tau)$  es la salida del agente  $i$  en el tiempo  $t - \tau$ ; y  $y_j(t - \tau)$  es la salida del agente vecino  $j \in N_i$  en el tiempo  $t - \tau$ .

Está claro que el sistema no es capaz de lograr un consenso externo debido a la existencia de retrasos inducidos por la red. Además, las actualizaciones continuas de control y la comunicación continua entre agentes conllevan una pérdida innecesaria de recursos. Para solucionar estos problemas, en este artículo se aplica la estrategia de predicción descrita por [17] para predecir la salida de los agentes y compensar los efectos de los retrasos inducidos por la red. Además, se introduce el mecanismo de activación por eventos descrito por [38], considerando la predicción de la salida de los agentes para evitar la operación continua. Posteriormente, se propone el protocolo de consenso externo distribuido para resolver el problema de consenso externo del sistema.

### III. PROTOCOLO DE CONSENSO EXTERNO ACTIVADO POR EVENTOS

Teniendo en cuenta la predicción de salida de los agentes, se propone el mecanismo distribuido activado por eventos de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \sigma_i(t) &= \frac{1}{2} \sum_{j \in N_i} (y_i(t) - y_j(t))^2 \\ e_i(t) &= y_i(t) - \hat{y}_i(t), \quad \hat{y}_i(t) = \sum_{j \in N_i} (y_i(t) - y_j(t)) \end{aligned} \quad (5)$$

donde  $e_i(t)$  es el error de medición del agente  $i$ ;  $t$  ( $k = 0, 1, \dots$ ) representa el  $k$ -ésimo tiempo de activación del agente  $i$ ;  $j$  significa el último tiempo de activación del agente  $j$ ;  $y_j(t)$  denota el

predicción de salida del agente vecino  $j$ ; y  $\sigma_i$  es un  $j$  positivo y la selección de variable. El análisis de  $y_j(t)$  se analiza  $j$  son más adelante. Por lo tanto, cada agente actualiza su propia ley de control en sus propios momentos de activación.

Observación 1: En comparación con los trabajos existentes [20]–[27], los retardos inducidos por la red se consideran en el diseño del mecanismo de activación por eventos (5), lo cual resulta relevante en situaciones prácticas. Su diseño se basa en la salida con compensación de retardo para obtener un tiempo de activación más preciso.

Sea  $h$  el periodo de muestreo y  $t = sh$  el tiempo de muestreo, donde  $s = 0, 1, 2, \dots$ . Con el mecanismo de activación por eventos (5), cada agente puede monitorear su propia información durante cada periodo de muestreo. Una vez que se cumple la condición de activación, se activa un evento inmediatamente. En el momento de activación del evento, el agente  $i$  actualizará su propio controlador.

y transmite su información actual a sus vecinos, y el error de medición  $e_i(t)$  se restablecerá a cero. Por lo tanto, el siguiente tiempo de activación  $t_{k+1}^i$  puede determinarse por:

$$t_{k+1}^i = \inf\{t : t > t_k^i, e_i(t) \geq \sigma_i z_i(t)\} \quad (6)$$

donde se puede ver que el límite inferior del intervalo de tiempo de activación es  $h$ ; en otras palabras, el tiempo de activación es un múltiplo entero de  $h$ , lo que puede evitar actualizaciones de control continuas y comunicación entre agentes.

Por otra parte, cuando el evento se desencadena en  $t = t_k^i$ , el agente debe enviar información a sus vecinos a través de la red de comunicación. Para gestionar el retardo inducido por la red, se aplica una estrategia de predicción basada en el modelo de series temporales (2), el protocolo de control externo (4) y el mecanismo de activación por eventos, sin considerar la compensación del retardo. Esta estrategia se utiliza para generar una secuencia de predicción de salida desde el tiempo  $t - \tau + 1$  hasta  $t$  recursivamente.

En este caso, definimos  $y_{ei}(t - \tau)$  como (7) y  $y_{ri}(t - \tau)$  como (8).

La predicción de salida de un paso por delante para el agente  $i$  en el tiempo  $t - \tau$  se puede diseñar como (9)-(11), que se muestra en la parte inferior de esta página. Luego, correspondientemente a las funciones de predicción de salida de un paso adelante, se pueden obtener la predicción de salida y la predicción de entrada del agente  $i$  desde el tiempo  $t - \tau + 1$  hasta  $t$ ; para  $p = 1, 2, \dots$  los resultados de la predicción de salida de  $p$  pasos adelante se muestran en (13)-(15), como se muestra en la parte superior de la página siguiente.

$$y_{ei}(t - \tau) = K_i(y_i(t - \tau) - y_j(t - \tau) - N_i y_{ri}(t - \tau) - R(t - \tau) - y_i(t - \tau)) \quad (7)$$

$$- \tau) - y_i(t - \tau), \quad y_o = F \quad (8)$$

La información recibida sobre los vecinos se proporciona mediante

$$Y^j = [y_j(t - \tau), y_j(t - \tau + 1), \dots, y_j(t - \tau + 1)]^T, \quad N_i \quad (12)$$

Observación 2: De (13) a (15), la idea principal de la estrategia de predicción es que la decisión sobre el comportamiento del agente a seguir se basa no solo en la secuencia de información disponible actualmente, sino también en la secuencia de información de predicción futura. Su construcción es simple y su cálculo es sencillo.

Los efectos de los retrasos inducidos por la red se pueden compensar activamente utilizando la información de predicción de  $\tau$ -paso adelante sobre los agentes en lugar de información en el momento  $t$ . Se pueden encontrar más detalles sobre la estrategia de predicción utilizada en [17].

Para compensar el retraso constante inducido por la red  $\tau$ , La predicción de salida del agente  $i$  se selecciona como

$$\begin{aligned} \bar{y}^i(t) &= y_i(t - \tau) = S Y^i \\ S &= [1, 0.1 \times (\tau - 1)] \\ Y^i &= [y_i(t - \tau), y_i(t - \tau + 1), \dots, y_i(t - \tau + 1)]^T \end{aligned} \quad (16)$$

donde  $S$  es el selector diseñado. La predicción de salida  $\bar{Y}^i$  se enviará a información través de la red y se convertirá en la secuencia  $\bar{Y}^j$ , ya que la es recibida por otros agentes.

Sobre todo, el protocolo de consenso externo con compensación de retardo bajo el mecanismo activado por eventos se propone como (17), que se muestra en la parte superior de la página siguiente, donde  $t_{k+1}^i = t_k^i + \tau$ .

[El retraso de comunicación se induce solo durante la transmisión de información, por lo que el valor real de  $y_i(t - \tau)$  está disponible en este caso.  $y_i(t - \tau)$  está disponible en este caso. Está claro que, en comparación con el protocolo de control (4), el protocolo de control (17) tiene las ventajas tanto de un mecanismo activado por eventos como de una estrategia de predicción, lo que conduce a un esquema de control basado en eventos y con compensación de retardo.

Observación 3: Con el apoyo del resultado de [17], se aplica la estrategia de predicción recursiva para compensar activamente los efectos de los retrasos inducidos por la red. Sin embargo, se introduce el mecanismo de activación por eventos para diseñar el

$$y_i(t - \tau + 1) = -n y_i \quad \text{if } y_i(t - \tau + 1) + b i 0 u_i(t - \tau) + f = 1 \quad \text{if } u_i(t - \tau) \quad (9)$$

$$y_{ei}(t - \tau + 1) = K_i \quad y_i(t - \tau + 1) - y_j(t - \tau + 1) - N_i \quad (10)$$

$$u_i(t - \tau + 1) = -d i 0 y_{ei}(t - \tau + 1) - \quad \text{if } y_{ei}(t - \tau + 1), f = 1 \quad y_o = F \quad (11)$$

$$\begin{aligned}
& \min\{n_{yi}, p-1\} \\
& y_i(t - \tau + p|t - \tau) = \text{aif } y_i(t - f - \tau + p|t - \tau) - \text{aif } y_i(t - f - \tau + p) \\
& \quad f = 1 \quad f = p \\
& \quad \min\{\text{tamaño}, p-2\} \quad \text{grande} \\
& + \text{bif } u_i(t - f - \tau - 1 + p|t - \tau) + \text{bif } u_i(t - f - \tau - 1 + p) f = p-1 \\
& \quad f = 0
\end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned}
& y_{ei}(t - \tau + p|t - \tau) = K_i \quad y_i(t - \tau + p|t - \tau) - y_j(t - \tau + p|t - \tau) \quad j \quad k \quad - \tau + p|t \quad j \quad k \quad - \tau) \\
& \quad j \quad N_i \\
& \quad \min\{n_{ci}, p-1\} \quad N_{ci} \\
& - \text{cif } u_i(t - f - \tau + p|t - \tau) - \text{cif } u_i(t - f - \tau + p) f = p \text{ ndi}
\end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned}
& \quad f = 1 \\
& \quad \min\{n_{di}, p-1\} \quad \text{espacio diferencial } (t - f - \tau + p) \\
& + \text{dif } y_i(t - f - \tau + p|t - \tau) + \quad f = p \\
& \quad f = 0 \quad \min\{n, p-1\} \quad y \\
& - \text{dif } y_{ei}(t - f - \tau + p|t - \tau) - \text{dif } y_{ei}(t - f - \tau + p), i \quad F f = p \text{ nci} \\
& \quad f = 0 \\
& \quad \min\{n_{ci}, p-1\} \\
& - \text{cif } u_i(t - f - \tau + p|t - \tau) - \text{cif } u_i(t - f - \tau + p) f = p \\
& \quad f = 1 \\
& \quad \min\{n_{di}, p-1\} \quad y \\
& - \text{dif } y_{ei}(t - f - \tau + p|t - \tau) - \text{dif } y_{ei}(t - f - \tau + p), i \quad Q f = p \\
& \quad f = 0
\end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned}
& G_i(q) R(t_k^i) - y_i(t_k^i) - A \quad (y_i(t_k^i) - y_j(t_k^i)), \quad y_o = F \\
& u_i(t) = \quad j \quad N_i \\
& -G_i(q^{-1}) K_i (y_i(t_j^i) - y_j(t_k^i) - y_j(t_k^i)), \quad y_o = Q
\end{aligned} \quad (17)$$

Protocolo de control propuesto (17), lo que significa que dicho protocolo es un esquema de control basado en eventos. Si la condición del evento  $i$  se cumple en  $t = t$ , la señal de control  $u_i(t)$  es  $k$ , se actualiza y la salida del agente  $y_i(t)$  se transmite a sus vecinos. De lo contrario, no se realiza ninguna operación y  $u_i(t)$  permanece sin cambios hasta el siguiente tiempo de activación  $t = t + k + 1$ .

De esta manera, si no se aplica el mecanismo activado por eventos, el protocolo de control (17) es el mismo que el de [17].

Observación 4: El protocolo de control (17) se propone combinando una estrategia de predicción con un mecanismo activado por eventos. En teoría, el límite superior del retardo temporal que puede compensarse depende del horizonte de predicción definido.

#### IV. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD Y CONSENSO. En esta sección,

analizamos la estabilidad y el consenso externo del NMAS subyacente con el protocolo de consenso propuesto (17). Para comenzar, partimos de la siguiente premisa.

Supuesto 3: Solo al agente  $i = 1$  se le da la entrada de referencia externa.  $-1$  Para simplificar, sea  $A_i(q^{-1} G_i(q)) = A_i$ ,  $B_i(q^{-1}) = \text{Con}$ , y  $y_i = G_i$ . Entonces, establecemos el siguiente teorema.

**Teorema 1:** Para un NMAS con el protocolo de consenso externo (17), se puede garantizar la estabilidad y se puede lograr el consenso si  $\sigma_i$  en el mecanismo activado por eventos (5) satisface la siguiente desigualdad:

$$0 < \sigma_2^i < \frac{\lambda_{\min}^2(v_i + 1)4}{(2v_i + 1)\lambda_{\min}^2(v_o)}, \quad 0 < \sigma_1 < 1, v_i > 0 \quad (18)$$

donde  $\lambda_{\min}$  es el valor propio máximo de la matriz laplaciana  $L$ ; y  $v_i$  es una variable positiva.

**Demostración:** Sustituyendo el protocolo de control (17) en el modelo de agente (2), tenemos, para  $t \in [t_{k, k+p}^i, t_{k, k+p}^i)$

$$y_i(t + 1) = A^{-1} y_i(t) + B u_i(t)$$

$$\begin{aligned}
& A^{-1} y_i(t) + B_i G_i(R(t_k^i) - y_i(t_k^i)) \\
& - B_i G_i K_i (y_i(t_k^i) - y_j(t_k^i) - y_j(t_k^i)), \\
& = \quad j \quad N_i \\
& \quad y_o = 1 \\
& A^{-1} y_i(t) - B_i G_i K_i (y_i(t_k^i) - y_j(t_k^i)), \\
& \quad j \quad N_i \\
& \quad i = 2, 3, \dots, n
\end{aligned} \quad (19)$$

donde  $A_{ii}^{-1} = -a_{i1} - a_{i2}q$ ) = H es una constante, como se sabe t. ki

Introducir el error de predicción  $\epsilon_j = \bar{y}_j(t_k) - y_j(t_k)$ . Entonces uno tiene:

$$\begin{aligned} \text{dia}(\mathbf{t}) &= \sum_j \sum_{\mathbf{N}_i} (y_i(\mathbf{t})_{\mathbf{k}_j}) - \sum_j y_j(\mathbf{t})_{\mathbf{k}} \\ &= \sum_j \sum_{\mathbf{N}_i} (y_i(\mathbf{t})_{\mathbf{k}}) - y_i(\mathbf{t}) - y_j(\mathbf{t})_{\mathbf{k}}^{\text{yo}} + y_j(\mathbf{t}) \\ &\quad - \epsilon_j + y_i(\mathbf{t}) - y_j(\mathbf{t}) (\epsilon_i(\mathbf{t}) - \\ &= \epsilon_j(\mathbf{t}) + (y_i(\mathbf{t}) - y_j(\mathbf{t})) - (\epsilon_j) \quad j \quad \mathbf{N}_i \quad j \quad \mathbf{N}_i \quad j \quad \mathbf{N}_i \end{aligned} \quad (20)$$

donde la salida de predicción  $y_j(t)$  (recibido  $y_k$ ) se puede obtener mediante el  
información de los vecinos (12) y el valor de  $y_j(t)$  se puede obtener en el tiempo  $k$   
 $t_k$ ; por lo tanto, el valor del error de predicción  $e_j$  está disponible.

Además, sustituya (20) en (19). Entonces, para  $i = 1, 2, \dots$ , note que la ecuación (19) se puede reescribir en la siguiente forma compacta:

$$\begin{aligned} y(t+1) &= (A-B)y(t) - Be(t) + B\varepsilon + H) - y(t) + \\ e(t+1) &= y(t) - y(t) + y(t) - y(t+1) \\ &= (I-A+B)y(t) + (I+B)e(t) - B\varepsilon - H \quad (21) \end{aligned}$$

d'onde

$$H = [B_1 G_1 (R(t_{1:k} - k), 0)^T - y_1(t)), 0, \dots$$

$$\varepsilon = [\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n]^T$$

$$\mathbf{e}(t) = [e_1(t), e_2(t), \dots, e_n(t)]^T$$

$$y(t) = [y_1(t), y_2(t), \dots, y_n(t)]^T$$

$$Y_0 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & \dots \\ \vdots & \dots & \ddots \\ 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}$$

$$A_1 \quad 0 \quad \dots 0$$

$$A = \begin{pmatrix} 0 & A^* & 2 & \dots & \vdots \\ \vdots & \dots & \dots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & A \end{pmatrix}$$

$$\text{BiGiK1} \quad 0 \quad \dots \quad 0$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 & B_2 G_2 K_2 & \dots & \vdots \\ \vdots & \dots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & B_n G_n K_n \end{pmatrix}$$

$$I_{11} \quad I_{12} \quad \cdots \quad I_{1n}$$

.	I21	I22	. . .	:
	:			:
	:	. . .	.	:
			.	:
I n1	. . .	. . .		colorio

De (21) se puede concluir que el valor de salida y el error de medición para la próxima vez se pueden obtener mediante . Valor de tiempo actual. Sea  $w(t) = [y]^T(t), e^T(t), e^T, H^T]^T$  Entonces, reescriba (21) para obtener

$$w(t+1) = Gw(t) \quad (22)$$

d'onde

$$G = \begin{matrix} & \begin{matrix} A & -B & -BBI \end{matrix} \\ \begin{matrix} Yo & -A & +BI & +B & -B & -Yo & 0 & 0 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 & & & & & & 1 & 0 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 & & & & & & 0 & 1 \end{matrix} \end{matrix}$$

Elija la siguiente función de Lyapunov

$$V(t) = w^T(t)Pw(t) \quad (23)$$

Teniendo en cuenta el mecanismo activado por eventos (5), la diferencia hacia adelante de la función de Lyapunov (23) se puede dar por

$$V(t) = V(t+1) - V(t)$$

$$T = w(t) G^T P G - P$$

$$0 \quad s \lambda_{Y_0}^2 I$$

$$+ \quad Y_0 \sigma \lambda_{Y_0}^2 \quad Y_0 \sigma \lambda_{Y_0}^2 \quad Y_0 0 \quad \text{peso}(t) \quad (24)$$

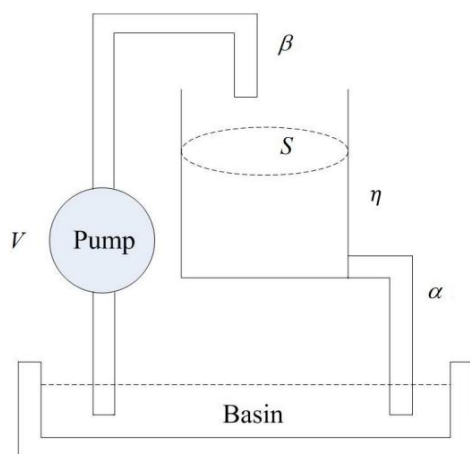
d'onde

$$\begin{aligned} z(t) &= Le(t) + Ly(t) - L\varepsilon z(t) \\ &= [z_1(t), z_2(t), \dots, z_n(t)]^T \quad 0 \leq t \leq T \end{aligned}$$

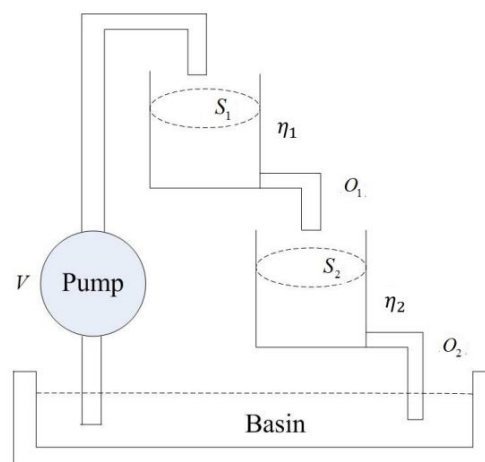
Se puede concluir que el sistema es estable si existe una matriz definida positiva  $P$  en (23) que da  $V(t) < 0$ .

Tenga en cuenta que

[illegible]



**FIGURA 1.** Diagrama de planta de los Agentes 1 y 3.



**FIGURA 2.** Diagrama de planta del Agente 2.

Realizando una transformación elemental de matriz en (25) se obtiene (26), como se muestra en la parte inferior de esta página.

Por tanto, la estabilidad del sistema queda demostrada<sup>2</sup> (en + 1) + si se cumple  $-\gamma(2v+1)\sigma 2\lambda 4 < 0$  de (26), es decir

$$0 < \sigma^2 < \frac{2}{(2\nu + 1)\lambda} \frac{(en + 1)}{4}, \quad 0 < \sigma < 1, \nu > 0. \quad (27)$$

Observación 5: Se puede observar que la introducción de  $\sigma$  y  $v$  conduce a una mayor flexibilidad en las condiciones, y el mecanismo distribuido activado por eventos (5) se diseña seleccionando valores de diferencia de  $\sigma_i$  y  $v_i$  de (27), donde  $0 < \sigma_i \leq \sigma$  y  $0 < v_i \leq v$  según el requisito.

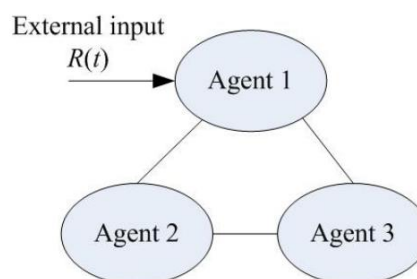
Además, se dice que un NMAS alcanza el consenso si

$\lim_{t \rightarrow \infty} y_i(t) - y_j(t) = 0, i, j \quad \forall, i = j$ . Si el sistema es estable, se puede concluir que  $\lim_{t \rightarrow \infty} (y_i(t+1) - y_i(t)) = 0$ , lo que resulta en  $\lim_{t \rightarrow \infty} (u_i(t+1) - u_i(t)) = 0$ .

De la ecuación (14), se obtiene  $\lim_{t \rightarrow \infty} R(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} y_i(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} y_j(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} y_j(t)$ , lo que significa que se puede lograr el consenso externo. Por lo tanto, se completa la demostración del teorema 1.

## V. SIMULACIÓN NUMÉRICA

En los sistemas de control de procesos, cada planta de proceso puede considerarse un agente o un subsistema. Considere un NMAS con tres agentes indexados por 1, 2 y 3. Los agentes 1 y 3 son sistemas de un solo tanque de agua, y el agente 2 es un sistema de dos tanques. Estos dos tipos de agentes se muestran en las figuras 1 y 2, respectivamente. Las especificaciones de estos dos agentes se pueden consultar en las tablas 1 y 2, respectivamente. Además, la estructura topológica de comunicación del NMAS se muestra en la figura 3. Solo el agente 1 está conectado a la entrada de referencia  $e$ .



**FIGURA 3.** Estructura topológica del NMAS.

**TABLA 1.** Parámetros del sistema de tanque único.

Parameter	Value	Description
$S$	$500\text{cm}^2$	Cross-sectional area of the tank
$\alpha$	50	Constant related to the out-flow rate
$\beta$	120	Constant related to the in-flow rate
$g$	$980\text{cm/s}^2$	Gravity constant

**TABLA 2.** Parámetros del sistema de dos tanques.

Parameter	Value	Description
$S_1$	$500cm^2$	Cross-sectional area of tank 1
$O_1$	$9cm^2$	Section of outlet hole of tank 1
$S_2$	$360cm^2$	Cross-sectional area of tank 2
$O_2$	$8.5cm^2$	Section of outlet hole of tank 2
$g$	$980cm/s^2$	Gravity constant
$\rho$	$0.001kg/cm^3$	Water density
$\alpha$	0.5	Scaling factor

El modelo matemático de estos dos tipos de agentes puede representarse mediante las siguientes ecuaciones diferenciales.

$$\frac{-v|}{\lambda_2} \frac{(-v-1)|}{Y_0} \frac{-\sigma \lambda_2 |}{-\sigma \lambda_2} \frac{-\sigma \lambda_2 |}{-v|} \rightarrow \frac{-v|}{-\sigma \lambda_2 |} \frac{(-v-1)|}{-\sigma \lambda_2} Y_0 (-v)^2 (v+1) + (2v+1)\sigma \lambda_2 \frac{4}{Y_0} | -v| < 0 \quad (26)$$



Agentes 1 y 3.

$$\frac{d}{dt} S = \beta V - \alpha 2g \eta dt \quad (28)$$

donde  $\eta$  y  $V$  representan la altura del nivel y la tensión de control.

Agente 2.

$$\begin{aligned} \frac{d\eta_1}{dt} &= -\frac{O_1}{S_1} \sqrt{2g\eta_1} + \frac{a}{\rho S_1} V \\ \frac{d\eta_2}{dt} &= \frac{O_1}{S_2} \sqrt{2g\eta_1} - \frac{O_2}{S_2} \sqrt{2g\eta_2} \end{aligned} \quad (29)$$

donde  $\eta_1$  y  $\eta_2$  son las alturas de nivel del tanque superior y del tanque inferior, respectivamente, y  $V$  representa el voltaje de control.

Luego, al utilizar el módulo de identificación del sistema en la simulación, estos dos tipos de agentes se pueden construir como el modelo de series de tiempo como (2), donde

$$\begin{aligned} Oh(q^{-1}) &= 1 - 1.612q^{-1} + 0.233q^{-2} + 0.379q^{-3} \\ Bi(q^{-1}) &= 0.0210 - 0.0218q^{-1} + 0.009q^{-2}, \quad y_0 = 1, 3 \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} A_2(q^{-1}) &= 1 - 2.100q^{-1} + 1.212q^{-2} - 0.112q^{-3} \\ B_2(q^{-1}) &= 0.122 - 0.238q^{-1} + 0.117q^{-2} \end{aligned} \quad (31)$$

El controlador local está diseñado para garantizar la estabilidad del sistema único sin retrasos inducidos por la red, lo que se da por

$$\begin{aligned} T_u(q^{-1}) &= 1 - q^{-1}, \quad E_n(q^{-1}) = 0.15 - 0.1498q^{-1}, \\ C_2(q^{-1}) &= 1 - q^{-1}, \quad D_2(q^{-1}) = 0.1 - 0.098q^{-1} \end{aligned} \quad (32) \quad (33)$$

El parámetro  $K_i$  en (17) representa la ganancia positiva utilizada como un parámetro de ajuste que fortalece o afloja el acoplamiento entre agentes. Se aplican valores más altos o más bajos de  $K_i$  cuando se requiere que el seguimiento permanezca ajustado o cuando se necesita aflojar la conexión. Además, el tiempo de disparo depende de las variables ( $v_i$ ,  $\sigma_i$ ). Según la simulación, la selección de  $v_i$  está relacionada con la ganancia positiva, donde cuanto mayor sea el valor de  $K_i$ , mayor será el valor de  $v_i$ . Después de seleccionar el valor de  $v_i$ , la condición de disparo es más difícil de alcanzar con un valor más bajo de  $\sigma_i$ . Sobre todo, los valores de estos parámetros se seleccionan como  $(K_1, K_2, K_3) = (0.1; 4.2; 4.5)$ ;  $(v_1, \sigma_1) = (1.0; 0.005)$ ;  $(v_2, \sigma_2) = (4.0; 0.13)$ ;  $(v_3, \sigma_3) = (4.0; 0.08)$ ; período de muestreo  $h = 0.1$  s.

Con base en estos parámetros, el NMAS puede alcanzar un consenso con el protocolo de control (4) y un retraso inducido por la red  $\tau \leq 6$  pasos a través de los experimentos, como se muestra en la Figura 4. En otras palabras, cuando el retardo inducido por la red  $\tau > 6$  pasos, el NMAS considerado con el protocolo de control (4) no logra alcanzar un consenso. Por lo tanto, se selecciona para la simulación el retardo inducido por la red constante  $\tau = 10$  pasos. Como se muestra en la Fig. 5, el NMAS no logra el mismo consenso que el análisis. Además, a modo de comparación, se aplican a la simulación con el protocolo de control inducido por la red el protocolo de control (17) de [17] y el protocolo de control propuesto (17) en el artículo.

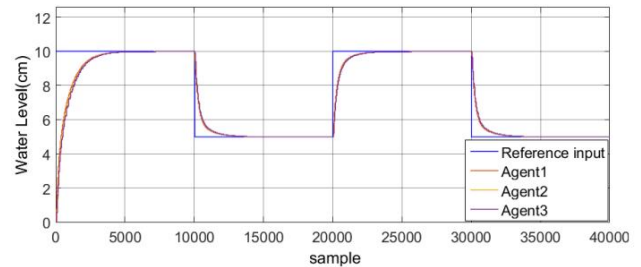


FIGURA 4. Salida de NMAS con el protocolo (4) y  $\tau = 6$  pasos.

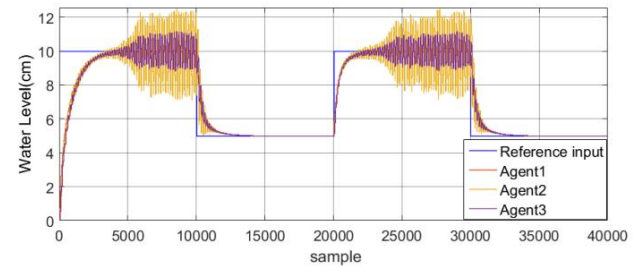


FIGURA 5. Salida de NMAS con el protocolo (4) y  $\tau = 10$  pasos.

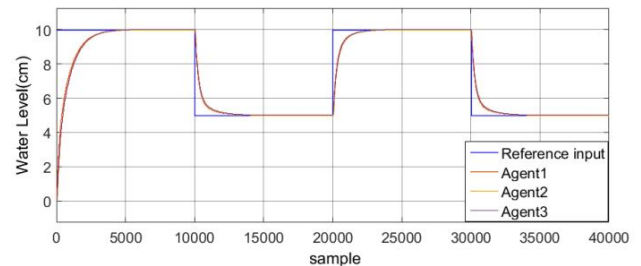


FIGURA 6. Salida de NMAS con el protocolo en [17] y  $\tau = 10$  pasos.

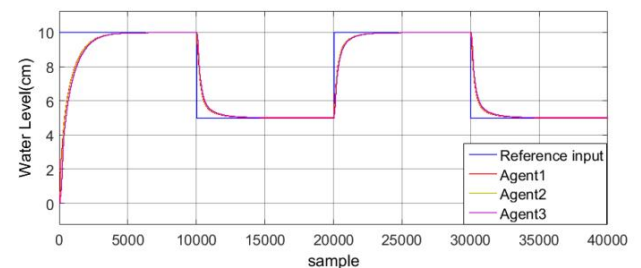


FIGURA 7. Salida de NMAS con protocolo (17) y  $\tau = 10$  pasos.

TABLA 3. Situación de activación de cada agente.

Input	Triggering times with control protocol in [17]	Triggering times with control protocol (17)
$u_1$	40000	2466
$u_2$	40000	1287
$u_3$	40000	424

Retardo  $\tau = 10$  pasos. Los resultados de la simulación se muestran en las figuras 6 y 7.

Se puede ver en las figuras 6 y 7 que, debido a la introducción de la compensación de retardo, ambos protocolos de control pueden



TABLA 4. Significado de los símbolos.

Symbols	Description
$t$	Sampling time, $t = sh$ , where $s = 0, 1, 2, \dots$
$h$	Sampling period
$N_i$	Set of neighbors of agent $i$
$n$	Number of agent
$A_i(q^{-1})$	Polynomial function of plant model
$B_i(q^{-1})$	Polynomial function of plant model
$C_i(q^{-1})$	Polynomial function of local controller model
$D_i(q^{-1})$	Polynomial function of local controller model
$n_{yi}$	Order of $A_i(q^{-1})$
$n_{ui}$	Order of $B_i(q^{-1})$
$n_{ci}$	Order of $C_i(q^{-1})$
$n_{di}$	Order of $D_i(q^{-1})$
$a_{i1}, \dots, a_{in_{yi}}$	Coefficients of $A_i(q^{-1})$
$b_{i0}, \dots, b_{in_{ui}}$	Coefficients of $B_i(q^{-1})$
$c_{i1}, \dots, c_{in_{ci}}$	Coefficients of $C_i(q^{-1})$
$d_{i0}, \dots, d_{in_{di}}$	Coefficients of $D_i(q^{-1})$
$q^{-1}$	Unit delay operator
$y_i(t)$	Output of agent $i$ at time $t$
$u_i(t)$	Control input of agent $i$ at time $t$
$\tilde{e}_i(t)$	Input of local controller
$e_i(t)$	Measurement error of agent $i$
$R(t)$	External reference input at time $t$
$G_i(q^{-1})$	$G_i(q^{-1}) = D_i(q^{-1})/C_i(q^{-1})$
$\tau$	Constant network-induced delay
$K_i$	Positive gain of agent $i$
$y_i(t - \tau)$	Output of agent $i$ at time $t - \tau$
$\mathcal{F}$	Set of agents with external reference input
$\mathcal{Q}$	Set of agents without external reference input
$t_k^i$	The $k$ -th triggering time of agent $i$ , where $k = 0, 1, 2, \dots$
$t_{k'}^j$	The last triggering time of agent $j$ at time $t_k^i$
$t_{k+1}^i$	Next triggering time of agent $i$ at time $t_k^i$
$y_i(t - \tau + p t - \tau)$	$p$ -step-ahead prediction output of agent $i$ at time $t - \tau$
$u_i(t - \tau + p t - \tau)$	$p$ -step ahead prediction control input of agent $i$ at time $t - \tau$
$\bar{y}_i(t)$	$\bar{y}_i(t) = y_i(t t - \tau)$ , $\tau$ -step-ahead prediction output of agent $i$ at time $t - \tau$
$p$	Prediction step
$\sigma$	Upper bound of $\sigma_i$
$\sigma_i$	Positive variable, $0 < \sigma_i \leq \sigma$
$v$	Upper bound of $v_i$
$v_i$	Positive variable, $0 < v_i \leq v$
$L$	Laplacian matrix of communication topology
$\lambda_L$	Maximum eigenvalue of $L$

Resuelve el problema de consenso externo para el NMAS considerado y puede producir una salida estable. Por otro lado, la situación de activación de cada agente se puede ver durante las simulaciones, como se muestra en la Tabla 3. En comparación con el caso del protocolo de control basado en muestras (17) en [17], donde se realizaron 40 000 activaciones en estas simulaciones, el protocolo de control propuesto (17) puede reducir eficazmente el número de actualizaciones de control y comunicaciones entre los agentes. Estos resultados muestran que el protocolo de control propuesto puede compensar el retraso inducido por la red y evitar actualizaciones de control y comunicaciones continuas mientras se puede lograr un consenso externo. Por lo tanto, se demuestra que los resultados propuestos en este artículo son menos conservadores que los de [17].

## VI. CONCLUSIÓN

El problema del consenso externo para un NMAS con un retraso de comunicación constante bajo un sistema activado por eventos

En este artículo se ha investigado el mecanismo. Se ha adoptado el modelo de series temporales para describir la dinámica de cada agente. Se ha aplicado una estrategia de predicción para compensar el retraso inducido por la red, utilizando el modelo de series temporales como modelo predictivo para predecir la salida del agente. Posteriormente, se introdujo el mecanismo de activación por eventos basado en la salida de predicción para reducir el número de actualizaciones y comunicaciones del controlador entre agentes. Como resultado, se propuso el protocolo de consenso externo y se analizaron la estabilidad y el consenso. Los resultados de la simulación numérica demostraron la eficacia del protocolo propuesto. En trabajos futuros, consideraremos el caso del retardo inducido por la red variable en el tiempo y las incertidumbres no lineales en el agente, comunes en sistemas prácticos.

## APÉNDICE

Véase la Tabla 4.

## REFERENCIAS

- [1] R. Olfati-Saber, J.A. Fax and R.M. Murray, "Consenso y cooperación en sistemas multiagente en red", Proc. IEEE, vol. 95, no. 1, págs. 215–233, enero de 2007.
- [2] Y. Cao, W. Yu, W. Ren y G. Chen, "Una visión general del progreso reciente en el estudio de la coordinación distribuida de múltiples agentes", IEEE Trans. Ind. Informat., vol. 9, no. 1, págs. 427–438, febrero de 2013.
- [3] Z. Zuo, Q.-L. Han, B. Ning, X. Ge y X.-M. Zhang, "Una descripción general de los avances recientes en el control cooperativo de tiempo fijo de sistemas multiagente", IEEE Trans. Ind. Informat., vol. 14, no. 6, págs. 2322–2334, junio de 2018.
- [4] X. Ge, Q.-L. Han y X.-M. Zhang, "Logro de la formación de clústeres de sistemas multiagente bajo muestreo aperiódico y retrasos de comunicación", IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 65, n.º 4, págs. 3417–3426, abril de 2018.
- [5] B. Chen y H.H. Cheng, "Una revisión de las aplicaciones de la tecnología de agentes en sistemas de tráfico y transporte", IEEE Trans. Intell. Transport. Syst., vol. 11, no. 2, págs. 485–497, junio de 2010.
- [6] Y. Xu y Z. Li, "Gestión distribuida óptima de recursos basada en el algoritmo de consenso en una microrred", IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 62, no. 4, págs. 2584–2592, abril de 2015.
- [7] N.A.M. Subha y G.P. Liu, "Consenso externo en sistemas multiagente con gran pérdida consecutiva de datos en redes no confiables", IET Control Theory Appl., vol. 10, no. 9, págs. 989–1000, junio de 2016.
- [8] S. Li, J. Wang, X. Luo y X. Guan, "Un nuevo marco de diseño de protocolo de consenso para sistemas complejos de múltiples agentes", Syst. Control Lett., vol. 60, no. 1, págs. 19–26, enero de 2011.
- [9] S. Yang y J.X. Xu, "Mejoras en 'Un nuevo marco de diseño de protocolo de consenso para sistemas complejos de múltiples agentes'", Syst. Control Lett., vol. 61, no. 9, págs. 945–949, septiembre de 2012.
- [10] X. Wang, S. Liu, X. Yu y J. Yang, "Consenso anti-disturbios activo distribuido para sistemas multiagente de orden superior líder-seguidor con perturbaciones no coincidentes", IEEE Trans. Autom. Control, vol. 62, no. 11, págs. 5795–5801, noviembre de 2016.
- [11] Z. Lu, L. Zhang y L. Wang, "Observabilidad de sistemas multiagente con topología de conmutación", IEEE Trans. Circuits Syst. II, Exp. Briefs, vol. 64, n.º 11, págs. 1317–1321, febrero de 2017.
- [12] B.-L. Zhang, Q.-L. Han y X.-M. Zhang, "Avances recientes en el control de vibraciones de plataformas marinas", Nonlinear Dyn., vol. 89, no. 2, págs. 755–771, abril de 2017.
- [13] X.-M. Zhang y Q.-L. Han, "Filtrado  $H^\infty$  basado en red utilizando un disparador tipo salto lógico", Automatica, vol. 49, núm. 5, págs. 1428–1435, mayo de 2013.
- [14] S.-P. Xiao, H.-H. Lian, K.L. Teo, H.-B. Zeng y X.-H. Zhang, "Un nuevo enfoque funcional de Lyapunov para el control de sincronización de datos muestreados para redes neuronales retrasadas", J. Franklin Inst., vol. 355, n.º 17, págs. 8857–8873, 2018.
- [15] X.-M. Zhang, Q.-L. Han y X. Yu, "Encuesta sobre avances recientes en sistemas de control en red", IEEE Trans. Ind. Informat., vol. 12, n.º 5, págs. 1740–1752, octubre de 2016.

- [16] GP Liu, Y. Xia, J. Chen, D. Rees y W. Hu, "Control predictivo en red de sistemas con retrasos de red aleatorios en canales de avance y de retroalimentación", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 3, págs. 1282–1296, junio de 2007.
- [17] NAM Subha y GP Liu, "Diseño e implementación práctica del protocolo de consenso externo para sistemas multiagente en red con retrasos de comunicación", *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 23, no. 2, págs. 619–631, marzo de 2015.
- [18] GP Liu, "Análisis de consenso y estabilidad de sistemas de control predictivo multiagente en red", *IEEE Trans. Cybern.*, vol. 47, no. 4, págs. 1114–1119, abril de 2017.
- [19] G.-P. Liu, "Control predictivo de sistemas multiagente en red mediante computación en la nube", *IEEE Trans. Cybern.*, vol. 47, núm. 8, págs. 1852–1859, agosto de 2017.
- [20] DV Dimarogonas y KH Johansson, "Control activado por eventos para sistemas multiagente", en *Proc. 48th IEEE Conf. Decis. Control*, diciembre de 2009, págs. 7131–7136.
- [21] L. Li, DWC Ho, J. Cao y J. Lu, "Fijación de la sincronización de clústeres en una matriz de redes neuronales acopladas bajo un mecanismo basado en eventos", *Neural Netw.*, vol. 76, págs. 1–12, abril de 2016.
- [22] L. Ding, Q.-L. Han, X. Ge y X.-M. Zhang, "Una descripción general de los avances recientes en el consenso activado por eventos de sistemas multiagente", *IEEE Trans. Cybern.*, vol. 48, no. 4, págs. 1110–1123, abril de 2018.
- [23] CX Dou, D. Yue, Q.-L. Han y JM Guerrero, "Esquema de control híbrido activado por eventos basado en sistemas multiagente para Internet de la energía", *IEEE Access*, vol. 5, págs. 3263–3272, marzo de 2017.
- [24] G. Guo, L. Ding y Q.-L. Han, "Una estrategia de transmisión distribuida activada por eventos para el consenso de datos muestrados de sistemas multiagente", *Automatica*, vol. 50, no. 5, págs. 1489–1496, mayo de 2014.
- [25] B.-L. Zhang, Q.-L. Han y X.-M. Zhang, "Control confiable  $H_\infty$  activado por eventos para estructuras offshore en entornos de red", *J. Sound Vib.*, vol. 368, págs. 1–21, abril de 2016.
- [26] X.-M. Zhang y Q.-L. Han, "Control  $H_\infty$  activado por eventos para una clase de sistemas de control en red no lineales utilizando nuevas desigualdades integrales", *Int. J. Robust Nonlinear Control*, vol. 27, núm. 4, págs. 679–700, marzo de 2017.
- [27] H. Que, M. Feng, Z.-G. Wu, H. Su, T. Huang y D. Zhang, "Sincronización exponencial mediante muestreo aperiódico de redes complejas retrasadas", *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. Syst.*, próximamente publicado.
- [28] Y. Fan y J. Yang, "Consenso promedio de sistemas multiagente con controladores autoactivados", *Neurocomputing*, vol. 177, págs. 33–39, febrero de 2016.
- [29] W. Hu, L. Liu y G. Feng, "Consenso de sistemas multiagente lineales mediante estrategia distribuida activada por eventos", *IEEE Trans. Cybern.*, vol. 46, no. 1, págs. 148–157, enero de 2016.
- [30] Q. Wang, Y. Yu y CY Sun, "Control de consenso basado en eventos distribuidos de un sistema multiagente con incertidumbres no lineales correspondientes", *Neurocomputing*, vol. 272, n.º 10, págs. 694–702, agosto de 2017.
- [31] Z.-G. Wu, Y. Xu, Y.-J. Pan, H. Su y Y. Tang, "Control activado por eventos para problemas de consenso en sistemas multiagente con mediciones de estado relativo cuantificadas y perturbaciones externas", *IEEE Trans. Circuits Syst. I, Reg. Papers*, vol. 65, no. 7, págs. 2232–2242, julio de 2018.
- [32] Z.-G. Wu, Y. Xu, Y.-J. Pan, P. Shi y Q. Wang, "Control de fijación activado por eventos para el consenso de sistemas multiagente con información cuantificada", *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. Syst.*, vol. 48, n.º 11, págs. 1929–1938, diciembre de 2017.
- [33] DD Zhao y T. Dong, "Consenso basado en observadores de orden reducido para sistemas multiagente con retardo de tiempo y estrategia de activación de eventos", *IEEE Access*, vol. 5, págs. 1263–1271, enero de 2017.
- [34] A. Wang, "Control de consenso basado en eventos para redes de un solo integrador con retrasos en el tiempo de comunicación", *Neurocomputing*, vol. 173, págs. 1715–1719, enero de 2016.
- [35] L. Li, DWC Ho y J. Lu, "Consenso de red basado en eventos con retrasos de comunicación", *Nonlinear Dyn.*, vol. 87, no. 3, págs. 1847–1858, febrero de 2017.
- [36] L. Li, DWC Ho y S. Xu, "Un esquema distribuido activado por eventos para el consenso multiagente en tiempo discreto con retrasos en la comunicación", *IET Control Theory Appl.*, vol. 8, no. 10, págs. 830–837, julio de 2014.
- [37] M. Yu, C. Yan, D. Xie y G. Xie, "Consenso de seguimiento activado por eventos con pérdidas de paquetes y retrasos variables en el tiempo", *IEEE/CAA J. Autom. Sinica*, vol. 3, no. 2, págs. 165–173, abril de 2016.
- [38] M. Yu, C. Yan y C. Li, "Control de seguimiento activado por eventos para sistemas multiagente de grupos de parejas", *J. Franklin Inst.*, vol. 354, págs. 6152–6169, julio de 2017.



QI LEI recibió las licenciaturas y maestrías en automatización de la Universidad Politécnica del Noroeste, Xian, China, en 1997 y 2000, respectivamente, y el doctorado en ciencias de control e ingeniería de la Universidad Central del Sur, Changsha, China, en 2007. En 2006, se unió al personal de la Universidad Central del Sur, donde ha sido profesora desde 2017. Sus intereses de investigación incluyen el control de procesos y el control inteligente.



JIA-HUI LI se licenció en automatización en la Universidad de Ciencia y Tecnología de Wuhan, Wuhan, China, en 2016. Actualmente cursa una maestría en la Facultad de Ciencias de la Información e Ingeniería de la Universidad Central del Sur, Changsha, China. Sus intereses de investigación incluyen el control de procesos y los sistemas de control multiagente en red.



GUO-PING LIU (M'97–SM'99–F'11) recibió los títulos de B.Eng y M.Eng en automatización de la Central South University, Changsha, China, en 1982 y 1985, respectivamente, y el título de Ph.D. en ingeniería de control de la Universidad de Manchester, Manchester, Reino Unido, en 1992.

Ha sido profesor de la Universidad de Gales del Sur, Pontypridd, Reino Unido, desde 2004, profesor visitante del Programa Cien Talentos de la Academia China de Ciencias, Pekín, China, desde 2001, y profesor visitante Changjiang Scholar del Instituto de Tecnología de Harbin, Harbin, China, desde 2008. Es autor y coautor de más de 200 artículos en revistas científicas y 10 libros sobre sistemas de control. Sus líneas de investigación actuales incluyen sistemas de control multiagente en red, identificación y control de sistemas no lineales, control avanzado de sistemas industriales y optimización y control multiobjetivo.

El Dr. Liu es miembro del IET y editor jefe de la Revista Internacional de Automatización y Computación.



MIN WU (SM'08–F'19) recibió la licenciatura y la maestría en ingeniería de la Universidad Central del Sur, Changsha, China, en 1983 y 1986, respectivamente, y el doctorado en ingeniería del Instituto Tecnológico de Tokio, Tokio, Japón, en 1999.

Fue miembro de la facultad de la Escuela de Ciencias de la Información e Ingeniería, Universidad Central Sur, de 1986 a 2014, y fue promovido a profesor, en 1994. En 2014, se trasladó a la Universidad de Geociencias de China, Wuhan, China, donde actualmente es profesor de la Escuela de Automatización. Fue académico visitante en el Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Tohoku, Sendai, Japón, de 1989 a 1990, e investigador visitante en el Departamento de Ingeniería de Control y Sistemas, Instituto Tecnológico de Tokio, de 1996 a 1999. Fue profesor visitante en la Escuela de Ingeniería Mecánica, de Materiales, de Manufactura y Gestión, Universidad de Nottingham, Nottingham, Reino Unido, de 2001 a 2002. Sus actuales intereses de investigación incluyen control de procesos, control robusto y sistemas inteligentes.

El Dr. Wu es miembro senior de la Asociación China de Automatización. Recibió el premio IFAC Control Engineering Practice Prize Paper Award en 1999 (junto con M. Nakano y J. She).

• • •