

# EL CONTROL DE SISTEMAS CIBERFÍSICOS INDUSTRIALES. REVISIÓN Y PRIMERA APROXIMACIÓN

Alberto Villalonga Jaén

Centro de Automática y Robótica (CAR) UPM-CSIC. España, Centro de Estudio de Fabricación Avanzada y Sostenible CEFAS Universidad de Matanzas. Cuba, alberto.villalonga@umcc.cu

Fernando Castaño Romero

Centro de Automática y Robótica (CAR) UPM-CSIC. España, fernando.castano@car.upm-csic.es

Rodolfo Haber Guerra

Centro de Automática y Robótica (CAR) UPM-CSIC. España, rodolfo.haber@car.upm-csic.es

Gerardo Beruvides López

Hitachi Europe GmbH. Munich. Alemania., gerardo.beruvides@hitachi-eu.com

Javier Arenas

Fagor Automation S. Coop. Mondragón. España, email:jarenas@fagorautomation.es

## Resumen

*Los sistemas ciberfísicos industriales (ICPS) abarcan las cuestiones de diseño, modelado y análisis de los sistemas ciberfísicos con especial énfasis en las aplicaciones industriales. El paradigma de la Industria 4.0 y las cuestiones asociadas a la transformación digital de la industria se pueden considerar un caso especial de ICPS. Uno de los pilares científico-técnicos para tratar el modelado y control de los ICPS es la inteligencia computacional y todos los métodos y técnicas agrupados dentro del control inteligente. En este trabajo se tratan algunos conceptos básicos de los ICPS, se presenta una aproximación a las principales estrategias de control utilizadas y algunas aplicaciones reportadas en la literatura.*

**Palabras clave:** Sistemas Ciberfísicos, Sistemas de Control, Inteligencia Artificial.

## 1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad el gran desarrollo de las tecnologías de la información y las comunicaciones, así como la convergencia de los sistemas físicos y cibernéticos han contribuido a la transformación de los sistemas embebidos tradicionales en sistemas ciberfísicos (CPS) con casos especiales de aplicaciones en la industria (ICPS). Los CPS se caracterizan por la integración y coordinación existente entre los procesos físicos y los sistemas computacionales a

través de la comunicación por medio de una red de todos sus componentes [1].

De este modo los CPS no son sólo sistemas complejos y a gran escala, sino también descentralizados, distribuidos y con elementos o componentes en red, heterogéneos y semiautónomos. La heterogeneidad radica no solo en las cuestiones dinámicas sino también por la gran diversidad de tecnologías e implementaciones muy intensivas en el software. El comportamiento emergente es otro importante rasgo diferenciador de los CPS, en los que la gran escala no tiene necesariamente un significado geográfico. Es decir, un sistema de sistemas puede ser una entidad local con subsistemas.

Un papel esencial en los CPS lo desempeñan los sistemas inteligentes para el modelado, control y simulación, esenciales para el control cooperativo y distribuido sobre redes de comunicación alámbricas o inalámbricas, la optimización y la toma de decisiones al más alto nivel [2]. Han surgido como una importante herramienta donde confluyen el control, las comunicaciones y la computación. Las aplicaciones de los sistemas ciberfísicos abarcan una amplia gama de sectores tales como la industria aeronáutica, el transporte, la industria de proceso, la medicina, la fabricación, entre otras [3].

La industria actual, inmersa en la cuarta revolución industrial, tiene ya altos estándares de producción y calidad, así como nuevos procesos con alta complejidad que han traído consigo la necesidad de utilizar nuevas técnicas de control borroso y neuroborroso aplicadas ya con éxito en sectores como la fabricación [4, 5]. Sin embargo, la transformación digital en cuestiones relevantes como

el mantenimiento y la monitorización convierten a los CPS y los métodos en desarrollo hacer frente a los nuevos retos científicos y técnicos de la transformación digital y la industria conectada aprovechando al máximo los datos almacenados y pre-procesados globalmente, procedentes de diferentes procesos y máquinas y tomar decisiones a nivel local o en un sentido más amplio de planta o fábrica [6, 7].

Los nuevos campos de aplicación, el incremento de la complejidad en los requisitos de control y los grandes avances tecnológicos han ido acompañados del desarrollo de nuevos métodos de control y la adecuación o el rediseño de técnicas tradicionales capaces de hacer frente a estas nuevas y complejas dinámicas. En este trabajo se realiza una revisión sobre los ICPS, las principales técnicas utilizadas en el control de los mismos, así como algunas aplicaciones a sistemas electromecánicos complejos. La sección 2 trata algunas generalidades de los ICPS, en la sección 3 se presenta una revisión acerca de cuatro de las principales estrategias de control para los ICPS. Finalmente, en la sección 4 se muestran las conclusiones.

## **2 SISTEMAS CIBERFÍSICOS. DEFINICIÓN Y PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS**

Aunque no existe una definición exacta y consensuada, los CPS se distinguen, a diferencia de los sistemas embebidos, por conferir una mayor importancia a la interacción entre el proceso físico y los sistemas computacionales [8]. No basta simplemente con entender las características de los sistemas y procesos físicos y conocer los elementos del sistema computacional, sino se debe comprender y aprovechar al máximo las nuevas potencialidades que se generan en la intersección y conjunción de ambos.

Los CPS surgen con el potencial de superar a paradigmas predecesores (e.g., sistemas flexibles de fabricación) con el fin de lograr una mayor eficiencia, seguridad, escalabilidad, sostenibilidad, adaptabilidad y robustez de los sistemas embebidos y en red en los que el software es intensamente utilizado. Estas características ofrecen la posibilidad de sistemas a gran escala con respuestas más rápidas, precisas, fiables y eficientes. Por ejemplo, la creación de sistemas inteligentes de transporte que debido a su rapidez de respuesta pueden evitar numerosos accidentes de tráfico, redes energéticas con mayor eficiencia, robots que pueden realizar cirugías con mayor precisión, líneas de fabricación con productos de mejor calidad y mayor eficiencia.

Como ya se ha mencionado con anterioridad, los ICPS son esencialmente heterogéneos no solo en términos de componentes sino también en términos de requisitos y especificaciones de diseño. Además

de sus propiedades funcionales, los CPS comparten características de los sistemas físicos tales como la dinámica, el tamaño físico, la tolerancia a fallos junto con las cuestiones de seguridad [9].

Los principales retos en la investigación se encuentran en la creación de métodos y herramientas capaces de aprovechar y alcanzar una mayor sinergia entre lo físico y lo cibernético. Esta sinergia permitirá abrir paso a nuevos campos para la investigación [10] y retos tecnológicos tales como abstracción de sistemas en tiempo real, el modelado y el control de sistemas híbridos, nuevos controles a través de la red, nuevas y potentes redes de sensores y actuadores, así como la simulación, verificación y validación de los ICPS.

### **2.1 SISTEMAS CIBERFÍSICOS INDUSTRIALES (ICPS).**

El término Industria 4.0 va asociado a la cuarta revolución industrial que se puede considerar como un nuevo nivel de digitalización, organización y control de toda la cadena de valor del ciclo de vida de los productos, su trazabilidad, la conectividad y la personalización del cliente [11].

La combinación de sistemas informáticos distribuidos en la planificación de productos y en la producción y la ingeniería con la utilización de datos adquiridos durante los procesos de fabricación de sensores y actuadores para realizar acciones de monitorización, control, la generación de nuevos conocimientos, el auto-aprendizaje y reconfiguración basadas en la condición o estado del proceso son funcionalidades clave de los ICPS [12]. Estas características son, por ejemplo, la base para una nueva generación de estándares de fabricación conocida como fabricación inteligente, extrayendo información relevante de los procesos, productos o servicios para garantizar una visualización global, una gestión eficiente y una representación completa del conocimiento [13]. Conceptos tales como la monitorización de la condición de las máquinas o procesos en tiempo real, las predicciones de fallos, la detección de anomalías, el diagnóstico, la nube como servicio y los productos con cero defectos se presentan como claves en las estrategias Industria 4.0 para aumentar los niveles de trazabilidad, competitividad y personalización [14].

## **3 SISTEMAS CIBERFÍSICOS. DEFINICIÓN Y PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS**

En la actualidad el creciente auge en la implementación de ICPS ha propiciado el surgimiento de nuevos retos para la ingeniería de control. Estos retos están condicionados por las nuevas y complejas dinámicas y el comportamiento emergente a las que tienen que hacer frente los

sistemas de control [15]. Es por ello, que muchas de las técnicas de control conocidas y consideradas en este trabajo hayan sido acondicionadas y nuevos métodos de control de inspiración cognitiva estén siendo desarrollados [16].

Entre las principales metodologías para el diseño de sistemas de control para ICPS reportadas en la literatura científica destacan el control en red, el control basado en eventos, el control distribuido, el control basado en pasividad y el control basado en la utilización de técnicas de inteligencia artificial.

### 3.1 SISTEMAS DE CONTROL EN RED

Los sistemas de control en red (NCS) son sistemas en los cuales se tiene en cuenta la dinámica de la red para el diseño de leyes de control. Se caracterizan por compartir una red de comunicación entre sensores actuadores y controladores, propiciando la transmisión de información entre los dispositivos para lograr compartir los recursos entre los elementos de la red [17]. Posee un canal de comunicación el cual consta de un o más lazos de control equipados con procesamiento de señales, optimización, operaciones de control, entre otras funciones. Son diseñados atendiendo a los requerimientos del sistema físico y no al desempeño o la estabilidad de la red. En la figura 1 se puede apreciar la estructura general de un NCS.

En el caso de los CPS, las estrategias de NCS eliminan el cableado innecesario reduciendo la complejidad y el coste tanto de diseño como de implementación de los sistemas. Pueden también ser fácilmente modificados a través de la adición de cualquier elemento necesario (tanto controladores, sensores, como actuadores) con relativo bajo coste y sin muchos cambios en su estructura.

Unos de los principales desafíos en el diseño de NCS son la pérdida de datos y las demoras en la transmisión y en la recepción desde los sensores a los controladores y de los controladores a los actuadores, por lo que se hace necesario el diseño un sistema que soporte la pérdida de paquetes, que sea capaz de realizar la decodificación parcial de los mismos, así como tolerar las demoras. Una alternativa para el chequeo de las pérdidas de información y las demoras en las comunicaciones es la utilización de redes inalámbricas [18]. Un punto importante a tener en cuenta en la utilización de redes inalámbricas es el consumo de energía puesto que muchos sensores y actuadores se encuentran ubicados en posiciones geográficas de difícil acceso por lo que un recambio de baterías de mañanera continua disminuirá su eficiencia, así como el adecuado uso del ancho de banda del medio físico, de ahí que se debe realizar el diseño de arquitecturas de control que permitan garantizar dichos requisitos [19].

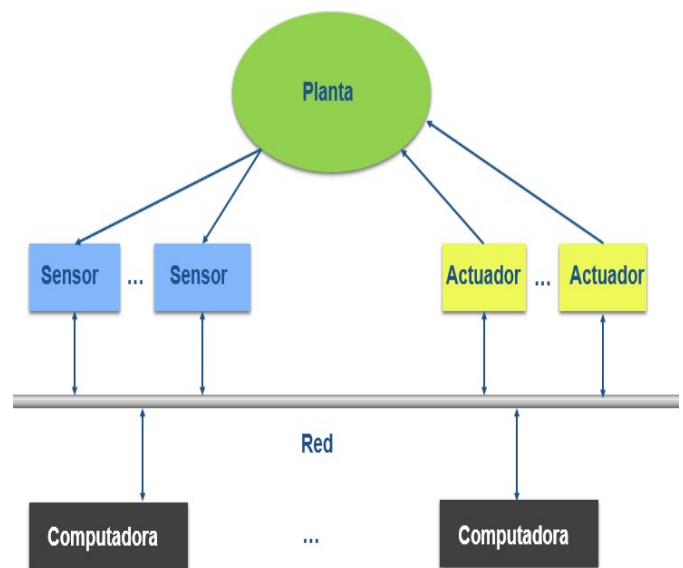


Figura 1: Estructura general de un NCS.

Para el tratamiento de las demoras y las pérdidas de paquetes en los sistemas de control en red inalámbrica se utilizan también la utilización de control predictivo basado en modelos, el diseño de un SRC utilizando un modelo de control predictivo en redes inalámbricas permiten mejorar la calidad del canal y utilizando una comunicación cooperativa, permitiría además obtener un ahorro de la energía consumida por lo elementos de la red [20]. También para la implementación de controladores con control predictivo basado en modelos se utilizan algoritmos de disparo por tiempo los cuales permiten un buen comportamiento antes las demoras y las pérdidas de paquetes de la red [21].

Los controles distribuidos son igualmente muy utilizados en los SRC debido a que garantizan la estabilidad además de permitir una mayor flexibilidad en cuanto a las demoras de la comunicación [22]. Además, permiten poder obtener la independencia de las demoras de la red haciendo uso de transformaciones lineales de las entradas y las salidas de la planta [23].

Las técnicas de optimización son muy aplicadas para diseñar estrategias para lidiar con las demoras. Entre los principales algoritmos utilizados destaca el recocido simulado que permite obtener buenos resultados haciendo frente a las posibles pérdidas de datos en la red y las restricciones físicas de los actuadores del sistema [24].

### 3.2 SISTEMAS DE CONTROL BASADOS EN EVENTOS

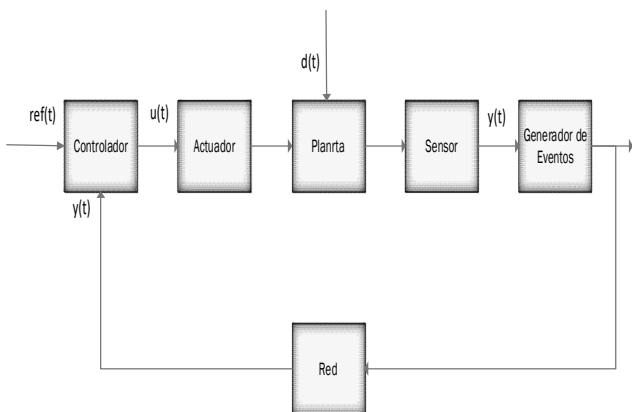
El control basado en eventos continúa siendo muy investigado y reportado en la literatura para reducir los tiempos de utilización de los recursos de cómputo y la comunicación entre sensores, controladores y

actuadores; propiciando que se produzca el intercambio de información entre estos componentes solo a partir de eventos cuando, por ejemplo, se sobrepasan los límites de error en el control. El instante de medición no se determina por un muestreo periódico sino mediante un generador de eventos el cual adapta el flujo de información en la realimentación al comportamiento en lazo cerrado del sistema. La actividad del controlador se ve reducida solo a intervalos de tiempo en los cuales es necesario su actuación para mantener los parámetros deseados del sistema. En la figura 2 se muestra la estructura de un sistema de control basado en eventos.

La reducción del intercambio de información permite aumentar la vida útil de la batería de los sensores y actuadores inalámbricos, reducir la carga computacional de los dispositivos, y disminuir el ancho de banda y la carga de la red.

Figura 2: Estructura de un sistema de control basado en eventos.

Una de las principales aplicaciones del control basado en eventos son las redes inalámbricas de sensores (WSN), que consisten en un conjunto de



sensores y actuadores conectados a través de un medio inalámbrico, teniendo en cuenta las limitaciones de ancho de banda que posee y además todos los nodos que la conforman utilizan baterías [19].

El diseño de un algoritmo basado en eventos para la comunicación asincrónica permite lograr la reducción del consumo de energía de los elementos del sistema y con ello el aumento de la vida útil de la batería de los mismos además de disminuir también la carga de la red, lo que propicia una disminución en las pérdidas de datos por colisión. También posibilita una disminución del consumo de energía global del sistema a través de una menor frecuencia de actuación del sistema [25].

El diseño de controladores descentralizados basados en la activación de eventos permite, tanto para sistemas lineales y no lineales, garantizar la capacidad de asimilar los retardos de la red y la pérdida de paquetes. En el caso de los sistemas lineales se puede usar un controlador con realimentación que sea capaz

de asegurar la estabilidad del sistema mientras que para sistemas no lineales se pueden conseguir diseños adecuados basados en LMI [26].

Otro método ampliamente utilizado en el diseño de sistemas de control activados por eventos para NCS distribuidos es la utilización de umbrales en las variables obteniéndose un ahorro considerable en el consumo de energía del sistema [26].

Aunque el control basado en eventos no es una metodología nueva ha tenido gran auge en la actualidad debido a sus aplicaciones en sistemas de control asincrónicos, mediciones y control en tiempo real. Sin embargo, todavía quedan temas a desarrollar como por ejemplo las posibles topologías a utilizar, la definición de los eventos y de la información transmitir, entre otros.

### 3.3 SISTEMAS DE CONTROL DISTRIBUIDOS

Los sistemas de control distribuidos (DCS) son sistemas en los cuales sus elementos se encuentran distribuidos y donde cada componente o sub-sistema controlado está compuesto por uno o más controladores. Todo el sistema, formado por varios y en ocasiones diferentes controladores, está conectado mediante redes de comunicación y de monitorización.

El principal rasgo de los DCS radica en la conexión y el intercambio de información entre cada subsistema los que propicia una buena cohesión y la distribución de las tareas con el fin de lograr los objetivos globales [27]. Comparados con los sistemas centralizados los DCS son considerados la tercera generación de sistemas de procesamiento de control y son ampliamente utilizados en el ámbito del control industrial.

Para el diseño de DCS se debe determinar una estructura de control adecuada en base a salidas locales de los controladores. En general el control descentralizado evita los problemas que pueden causar tanto el procesamiento como el almacenamiento de grandes volúmenes de información. Otra de las ventajas que proporcionan los DCS es la tolerancia a fallos debido a la posibilidad de la redundancia de controladores y conexiones. Asimismo, como aspecto importante está la posibilidad que tienen estos sistemas de continuar funcionando cuando se han desconectados o agregado uno o más nodos lo que se logra a través de la utilización de algoritmos de autoconfiguración. En la figura 3 se muestra una estructura típica de un DCS.

El control predictivo basado en modelo (MPC) es una técnica ampliamente usada en el diseño de controles distribuidos, entre los que encontramos: el control predictivo distribuido basado en modelo (DMPC por sus siglas en inglés) no cooperativo, que puede ser clasificado en secuencial, iterativo o basado en negociaciones [28]. La utilización del

control predictivo iterativo permite asimilar retardos asíncronos en la realimentación [29]. El control predictivo distribuido para sistemas discretos, con algoritmo no cooperativo permite también obtener una buenas estabilidad y precisión en el control [30].

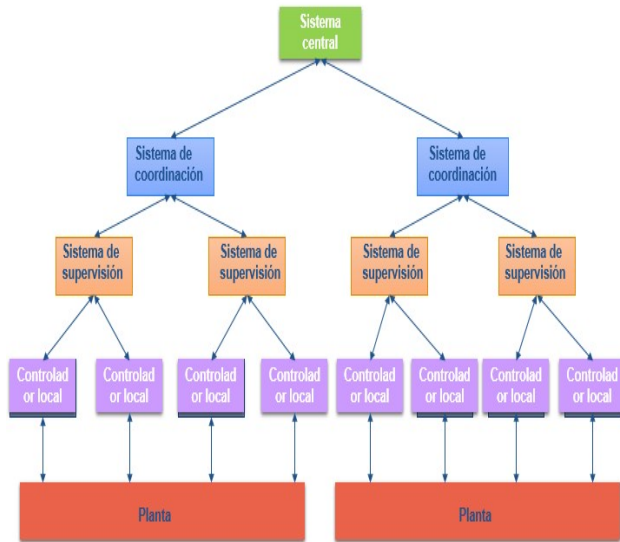


Figura 3: Estructura típica de un DCS.

Los MPC distribuidos basados en controladores de Lyapunov para sistemas no lineales permiten también asumir las demoras asíncronas introducidas por las mediciones [31]. El modelo de control predictivo cooperativo basado negociación de agentes brinda grandes posibilidades sobre todo garantizando la estabilidad del sistema debido a que en cada período de muestreo los agentes que componen el sistema negocian una solución de forma cooperativa [32].

El método de separación de variables utilizando MPC con controladores de Lyapunov aplicado al diseño de DMPC para sistemas no lineales con perturbaciones singulares permite también alcanzar buenos niveles de precisión en procesos complejos [33]. El uso de algoritmos distribuidos para la estimación de estados con MPC contribuyen a reducir los requisitos de la red en una arquitectura de control, demostrando que la utilización de un protocolo de comunicación basado en eventos mejora la estabilidad del sistema [34].

La variación de parámetros lineales (VLP) es otra técnica aplicada en el control distribuido de sistemas ciberfísicos, en [35] se fundamenta su aplicación y se presentan controladores VLP para sistema multiagentes mostrándose la estabilidad en el comportamiento.

### 3.4 SISTEMAS DE CONTROL BASADOS EN PASIVIDAD

El control basado en pasividad (CPB) es una herramienta que ha demostrado grandes potencialidades en el diseño de sistemas ciberfísicos

debido a las ventajas que ofrece en el diseño de sistemas a larga escala.

La pasividad es una herramienta clásica que permite el uso de enfoques basados en energías en sistemas dinámicos. Implica también otras propiedades tales como la estabilidad lo que le permite ser utilizada en el desarrollo de sistemas complejos proporcionándoles un comportamiento estable además de robustez.

Los CPB son capaces de solucionar los problemas que presentan las comunicaciones en red tales como retardos, pérdidas de información o distorsión de la misma. Para contrarrestar el efecto de las demoras en la red cuando se interconectan elementos pasivos se utiliza la transformación de la variable de la onda. Esta transformación se basa en un análisis energético de la red. Los demás efectos no deseados de la red son contrarrestados con enfoques energéticos propiciados por las características propias de los sistemas pasivos.

La utilización de la transformación de las variables de onda para el control y el análisis de la estabilidad aplicando sistema conmutados pasivo posibilita gran estabilidad [36]. La utilización de enfoques disipativos como el método de la velocidad cuadrática de alimentación permiten la compensación de retardos de la red en sistemas conmutados [37]. Los sistemas pasivos aplicados en el diseño de controladores para NCS permiten mitigar los efectos de las demoras de la red y las pérdidas de paquetes [9, 38]. Los métodos de control basados en pasividad se pueden aplicar igualmente a sistemas no lineales aunque estos en lazo abierto no sean pasivos, mientras que cuando se realimenten sean localmente pasivos [39].

Los índices pasivos también son una alternativa a los métodos de caracterización de la disipación de energía en los sistemas ya que permiten diseñar realimentaciones estables a sistemas no pasivos. La determinación de los índices pasivos permite que otros sistemas puedan ser analizados utilizando resultados similares al teorema de pasividad [40]. Esos pueden ser aplicados a sistemas lineales y no lineales multiagentes [41]. La determinación de índices pasivos puede ser un problema de gran complejidad en ciertos escenarios. Para ello se puede hacer uso de métodos experimentales como el propuesto en [42], donde se hace uso del método numérico de Hooke maximizar los índices.

### 3.5 SISTEMAS DE CONTROL INTELIGENTE

La Inteligencia Computacional (IC) es una rama de las ciencias de la computación en la cual los algoritmos permiten imitar o emular comportamientos o mecanismos humanos o bio-inspirados que son utilizados en el procesamiento y la toma de decisión a partir de datos inciertos. Las

técnicas de IC forman un conjunto de metodologías y técnicas computacionales que han sido desarrolladas para abordar problemas complejos basados en datos del mundo real para los cuales los modelos matemáticos tradicionales no ofrecen buenos resultados debido a: alta complejidad, incertidumbre y naturaleza estocástica de los procesos. La Lógica Difusa (FL), Algoritmos Evolutivos (EA) y Redes Neuronales Artificiales (ANN) forman tres pilares centrales de la IC que se han desarrollado para manejar esta creciente clase de problemas [43].

El empleo de las técnicas de IC en la industria actual ha permitido desarrollar máquinas capaces de realizar tareas de diseño y fabricación cada vez más avanzadas. Estas son capaces de aprender y mejorar su desempeño sin intervención humana. El área de los sistemas de control es una de las ramas de la ingeniería en la cual las técnicas de IC han tenido mayor impacto y aún más en el control de los ICPS debido a sus complejas dinámicas.

La aplicación de técnicas de lógica borrosa en el diseño de controladores y controles adaptativos es frecuente en sistemas en los cuales suele ser grande la influencia de las perturbaciones sobre el proceso a controlar [44]. También suelen ser de gran utilidad su aplicación en sistema que presenta no linealidades duras [45]. Además suelen brindar buen desempeño en el control de sistemas estocásticos no lineales con retardos de proceso desconocidos e incertidumbres [46, 47].

Otra técnica de gran aplicación en ambientes industriales es la hibridación de la lógica difusa y las redes neuronales para crear sistemas neuroborrosos. Una de las ventajas de la aplicación de esta técnica es que permite combinar la transparencia semántica y la robustez intrínseca de los sistemas borrosos con la capacidad de aprendizaje de las redes neuronales [48]. Esta principal ventaja permite que puedan ser utilizados en sistemas con dinámicas rápidas y de gran complejidad [49, 50]. También suelen hibridarse con algoritmos evolutivos para obtener una configuración óptima de sus parámetros garantizando así la estabilidad y la exactitud del control [51].

## 4 CONCLUSIONES

En este artículo se presentan los conceptos básicos relacionados con los CPS y los ICPS, se realiza una revisión de las principales estrategias de control que son utilizadas para el diseño de ICPS como son el control en red, el control basado en eventos, el control distribuido, el control basado en pasividad y el control inteligente mostrándose ejemplos reportados en la literatura científica. A partir del estudio se puede comprobar que el uso de los CPS las metodologías de control de ICPS están en desarrollo y se requieren de nuevos métodos para alcanzar prestaciones superiores y que sin duda alguna forman

parte del presente y el futuro del desarrollo de los de la industria moderna.

## Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo brindado por del convenio UAM-UMCC para actividades de investigación. Además, los autores desean agradecer el apoyo brindado por el proyecto IoSENSE: Flexible FE/BE Sensor “Pilot Line for the Internet of Everything”, en el programa ECSEL en virtud del acuerdo n° 692480.

## English summary

### INDUSTRIAL CYBER-PHYSICAL SYSTEMS: A REVIEW FROM CONTROL SYSTEMS.

#### Abstract

*Cyber-Physical systems (CPS) are the new generation of intelligent systems, which gives greater importance to the interaction between the physical processes and the computational components than their predecessors. It has become one of the fundamental pillars of the fourth industrial revolution which has brought with it the emergence of new challenges in the design of their control systems. This paper deals with the basic concepts of CPS and industrial cyber-physical systems (ICPS), presents a review of the main control strategies used for its design.*

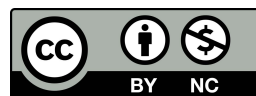
**Keywords:** Cyber Physical Systems, Control Systems, Artificial Intelligence.

#### Referencias

- [1] Park, K.J., R. Zheng, and X. Liu, Cyber-physical systems: Milestones and research challenges. *Computer Communications*, 2012. 36(1): p. 1-7.
- [2] Artuñedo, A., R.M. Del Toro, and R.E. Haber, Consensus-based cooperative control based on pollution sensing and traffic information for urban traffic networks. *Sensors (Switzerland)*, 2017. 17(5).
- [3] Baheti, R. and H. Gill, Cyber-physical Systems, in *The Impact of Control Technology*, T. Samad and A.M. Annaswamy, Editors. 2011, IEEE Control Systems Society: available at [www.ieeecs.org](http://www.ieeecs.org). p. 175-183.
- [4] Haber, R.E., et al., Controlling a complex electromechanical process on the basis of a neurofuzzy approach. *Future Generation Computer Systems*, 2005. 21(7): p. 1083-1095.
- [5] Haber-Guerra, R.E., et al., Networked fuzzy control system for a high-performance drilling

- process. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 2008. 130(3): p. 0310091-0310096.
- [6] Villalonga, A., et al. Condition-Based Monitoring Architecture for CNC Machine Tools Based on Global Knowledge. in *INCOM 2018 - 16th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing*. 2018.
- [7] Villalonga, A., et al. Industrial Cyber-Physical System for Condition-based Monitoring in Manufacturing Processes. in *ICPS 2018 - 1st. International Conference on Industrial Cyber Physical Systems*. 2018.
- [8] Kim, K.D. and P.R. Kumar, Cyber-physical systems: A perspective at the centennial. *Proceedings of the IEEE*, 2012. 100(SPL CONTENT): p. 1287-1308.
- [9] Kottenstette, N., et al., Design of networked control systems using passivity. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2013. 21(3): p. 649-665.
- [10] Frazzon, E.M., et al. Towards socio-cyber-physical systems in production networks. 2013. Setubal.
- [11] Rößmann, M., et al., Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries. Boston Consulting Group, 2015. 9.
- [12] Colombo, A.W., et al., Industrial cloud-based cyber-physical systems: The IMC-AESOP approach Vol. 9783319056241. 2024.
- [13] Ferrer, B.R. and J.L.M. Lastra. An architecture for implementing private local automation clouds built by CPS. in *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. 2017.
- [14] Ramis Ferrer, B. and J.L. Martinez Lastra, Private local automation clouds built by CPS: Potential and challenges for distributed reasoning. *Advanced Engineering Informatics*, 2017. 32: p. 113-125.
- [15] Beruvides, G., R. Quiza, and R.E. Haber, Multi-objective optimization based on an improved cross-entropy method. A case study of a micro-scale manufacturing process. *Information Sciences*, 2016. 334-335: p. 161-173.
- [16] Haber, R.E., et al., Artificial cognitive control with self-x capabilities: A case study of a micro-manufacturing process. *Computers in Industry*, 2015. 74: p. 135-150.
- [17] Zhou, K., et al. Advanced control technologies in cyber-physical system. 2013. Hangzhou, Zhejiang.
- [18] Hasan, S.M., H. Yu, and A. Carrington. Overview of Wireless Networked Control Systems over Mobile Ad-hoc Network. in *Proceedings of the 14th International Conference on Automation & Computing*. 2008. Brunel University, West London, UK.
- [19] Araujo, J., et al., System architectures, protocols and algorithms for aperiodic wireless control systems. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2014. 10(1): p. 175-184.
- [20] Ulsoy, A., O. Gurbuz, and A. Onat, Wireless Model-Based Predictive Networked Control System Over Cooperative Wireless Network. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2011. 7(1): p. 41-51.
- [21] Onat, A., et al., Control Over Imperfect Networks: Model-Based Predictive Networked Control Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011. 58(3): p. 905-913.
- [22] Goswami, D., R. Schneider, and S. Chakraborty. Co-design of cyber-physical systems via controllers with flexible delay constraints. in *16th Asia and South Pacific Design Automation Conference (ASP-DAC 2011)*. 2011.
- [23] Hirche, S., T. Matiakis, and M. Buss, A distributed controller approach for delay-independent stability of networked control systems. *Automatica*, 2009. 45(8): p. 1828-1836.
- [24] Cao, X., et al., An online optimization approach for control and communication codesign in networked cyber-physical systems. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2013. 9(1): p. 439-450.
- [25] Mazo, M. and P. Tabuada, Decentralized Event-Triggered Control Over Wireless Sensor/Actuator Networks. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2011. 56(10): p. 2456-2461.
- [26] Guinaldo, M., et al. Distributed event-triggered control with network delays and packet losses. in *2012 IEEE 51st IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*. 2012.
- [27] HYCON2, Systems and Control. 2011, Recommendations for a European Research Agenda towards Horizon 2020.
- [28] Christofides, P.D., et al., Distributed model predictive control: A tutorial review and future research directions. *Computers and Chemical Engineering*, 2013. 51: p. 21-41.
- [29] Liu, J., et al., Iterative Distributed Model Predictive Control of Nonlinear Systems: Handling Asynchronous, Delayed Measurements. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2012. 57(2): p. 528-534.
- [30] Farina, M. and R. Scattolini, Distributed predictive control: A non-cooperative algorithm with neighbor-to-neighbor communication for linear systems. *Automatica*, 2012. 48(6): p. 1088-1096.
- [31] Liu, J., D. Muñoz de la Peña, and P.D. Christofides, Distributed model predictive control of nonlinear systems subject to

- asynchronous and delayed measurements. *Automatica*, 2010. 46(1): p. 52-61.
- [32] Maestre, J.M., et al., Distributed model predictive control based on agent negotiation. *Journal of Process Control*, 2011. 21(5): p. 685-697.
- [33] Chen, X., et al. Model predictive control of nonlinear singularly perturbed systems: Application to a reactor-separator process network. in 2011 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference. 2011.
- [34] Trimpe, S. and R. D'Andrea, An Experimental Demonstration of a Distributed and Event-Based State Estimation Algorithm. *IFAC Proceedings Volumes*, 2011. 44(1): p. 8811-8818.
- [35] Hoffmann, C., A. Eichler, and H. Werner. Distributed control of linear parameter-varying decomposable systems. in 2013 American Control Conference. 2013.
- [36] McCourt, M.J. and P.J. Antsaklis. Control design for switched systems using passivity indices. in Proceedings of the 2010 American Control Conference. 2010.
- [37] McCourt, M.J. and P.J. Antsaklis, Control of Networked Switched Systems using Passivity and Dissipativity. *Automatisierungstechnik*, 2013.
- [38] Kottenstette, N., et al. Passivity-Based Design of Wireless Networked Control Systems for Robustness to Time-Varying Delays. in 2008 Real-Time Systems Symposium. 2008.
- [39] Wang, Y., V. Gupta, and P.J. Antsaklis, Passivity Analysis for Discrete-Time Periodically Controlled Nonlinear Systems. 2012, *ISIS*
- [40] McCourt, M.J. and P.J. Antsaklis. Stability of networked passive switched systems. in 49th IEEE Conference on Decision and Control (CDC). 2010.
- [41] Wu, P. and P.J. Antsaklis. Passivity indices for symmetrically interconnected distributed systems. in 2011 19th Mediterranean Conference on Control & Automation (MED). 2011.
- [42] Wu., P., M.J. McCourt., and P.J. Antsaklis., Experimentally Determining Passivity Indices: Theory and Simulation, in *ISIS Technical Report*. 2013, University of Notre Dame.
- [43] Iqbal, R., et al., Big Data analytics and Computational Intelligence for Cyber-Physical Systems: Recent trends and state of the art applications. *Future Generation Computer Systems*, 2017.
- [44] Wang, T., et al., Performance-Based Adaptive Fuzzy Tracking Control for Networked Industrial Processes. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2016. 46(8): p. 1760-1770.
- [45] Wang, T., et al., Network-Based Fuzzy Control for Nonlinear Industrial Processes with Predictive Compensation Strategy. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2017. 47(8): p. 2137-2147.
- [46] Gajate A. et al., Transductive-weighted neuro-fuzzy inference system for tool wear prediction in a turning process, *International Conference on Hybrid Artificial Intelligence Systems*, In *Lecture Notes in Computer Science 5572 LNAI Proceedings*. 2009. pp. 113-120.
- [47] Haber-Guerra, R.; Liang, S. Y.; Alique, J. R.; Haber-Haber, R., Fuzzy control of spindle torque in high-speed milling processes. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME* 2006, 128, (4), 1014-1018.
- [48] Haber, R. E. et al., Embedded fuzzy control system: Application to an electromechanical system in *International Conference on Computational Science. Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2003; Vol. 2658, pp 812-821.
- [49] Eshetu, W., P. Sharma, and C. Sharma. ANFIS based load frequency control in an isolated micro grid. in 2018 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). 2018.
- [50] Liyakhath, S., et al. Back propagation algorithm using ANFIS controller for wind-DG microgrid. in 2017 IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering (ICPCSI). 2017.
- [51] Soliman, M.A., et al., Hybrid ANFIS-GA-based control scheme for performance enhancement of a grid-connected wind generator. *IET Renewable Power Generation*, 2018. 12(7): p. 832-843.



© 2018 by the authors.  
Submitted for possible  
open access publication

under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC-BY-NC 3.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>).