

El Control de Sistemas Ciberfísicos Industriales. Revisión y Primera aproximación.

Alberto Villalonga Jaén^{ab}, Fernando Cataño Romero^{a*}, Rodolfo Haber Guerra^a, Gerardo Beruvides López^c, Javier Arenas^d

^a Centro de Automática y Robotica CAR UPM-CSIC.España

^b Centro de Estudio de Fabricación Avanzada y Sostenible CEFAS Universidad de Matanzas.Cuba

^c Hitachi Europe GmbH. Munich. Alemania.

^d Fagor Automation S. Coop. Mondragón. España..

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:

ciberfísico, sistemas de control, inteligencia artificial.

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, Control systems, Artificial Intelligence.

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 estrecha integración y coordinación existente entre los procesos físicos y los sistemas computacionales a través de la comunicación en red de todos sus componentes. (Park KJ, Zheng R, Liu X, 2012).

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 (Artuñedo et al., 2017). 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 (Baheti R, Gill H, 2011).

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 utilización de nuevas técnicas de control de control borroso y neuroborroso aplicadas ya con éxito en sectores como la fabricación (Haber, Alique, Alique, & Haber, 2005)(Haber-

Guerra, Haber-Haber, Martin Andres, & Palomar, 2008). 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 a modo global procedentes de diferentes procesos y máquinas y tomar decisiones a nivel local o en un sentido más amplio de planta o fábrica (Villalonga, Beruvides, Castaño, & Haber, 2018a) (Villalonga, Beruvides, Castaño, & Haber, 2018b).

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 con 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 dos aborda sobre las 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 (Kim KD, Kumar PR, 2012). 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 potenciales que se generan en la intersección y conjunción de ambos.

Los ICPS 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, precisa, 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 ICPS comparten características de los sistemas físicos tales como la dinámica, el tamaño físico, la tolerancia a fallos junto con las cuestiones de seguridad (Kottenstette N, Hall JF, Koutsoukos X, Sztipanovits J, Antsaklis P, 2013).

Los principales retos en la investigación se encuentran en la creación de métodos y herramientas capaces de proponer una mayor sinergia entre el mundo físico y el cibernético. Esta sinergia permitirá abrir paso a nuevos campos para la

investigación (Frazzon EM, Hartmann J, Makuschewitz T, Scholz-Reiter B 2013) 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, las potentes redes de sensores y actuadores, así como la simulación, verificación y validación de de los ICPS.

Las claves de desarrollo de estos sistemas se sustentan en las numerosas aplicaciones que poseen en los distintos campos de la ingeniería moderna, por lo que han sido llamados a cambiar el futuro de la manera en que las personas interactúan con el entorno.

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 máquina a máquina y la personalización del cliente (M. Rüßmann, et al 2015)

La combinación de sistemas informáticos distribuidos en 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 (Colombo. W, et al 2014). Estas características son, por ejemplo, la base para una nueva generación de estándares de fabricación conocida como fabricación inteligente, extrayendo información clave de los procesos, productos o servicios para garantizar una visualización global, una gestión eficiente y una representación completa del conocimiento (Ferrer B. Ramis and Martinez Lastra J. L, 2017a). 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 clave en las estrategias Industria 4.0 para aumentar los niveles de trazabilidad, competitividad y personalización (Ferrer B. R. and M. Lastra J. L, 2017b). A la vanguardia de estas estrategias se encuentran los ICPS.

3. Estrategias de control para ICPS

En la actualidad el creciente auge en la implementación de ICPS a traídos consigo el enfrentamiento a nuevos retos por parte los especialistas en diseño de sistemas de control. Estos retos vienen dados por la nuevas y complejas dinámicas a las cuales tienes que hacer frente los sistemas de control (Beruvides, Quiza, & Haber, 2016). Esto ha propiciado que antiguas técnicas hayan experimentado modificaciones, así como el surgimiento de nuevas estrategias de control (Haber, Juanes, Del Toro, & Beruvides, 2015).

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 y el control basado en pasividad.

3.1. Sistemas de control en Red

Los sistemas de control en red (SCR) son sistemas de control en los cuales se tiene en cuenta la dinámica de la red en la

realimentación. 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 y coordinar así operaciones en diferentes lugares de una misma región (Zhou K, Ye C, Wan J, Liu B, Liang L, 2013). 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 SCR.

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

Unos de los principales desafíos en el diseño de SCR 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. (Araujo J, Mazo M, Anta A, Tabuada P, Johansson KH, 2013) ejemplifican la utilización de redes inalámbricas en estos sistemas proponiendo una arquitectura de sistema de control la cual garantiza la estabilidad de la planta soportando demoras en la comunicación y la pérdida de datos además un mínimo consumo de energía y uso adecuado del ancho de banda de la red. (Hasan. S. M, Yu. H, Carrington. A, 2008) presentan una guía para el diseño efectivo de sistemas de control en red inalámbrica, aunque en este no se tienen en cuenta ni las demoras de la red ni la pérdida de paquetes, repasando los principales aspectos a tener en cuenta para el diseño de estos sistemas, así como los principales softwares que pueden ser utilizados para su simulación.

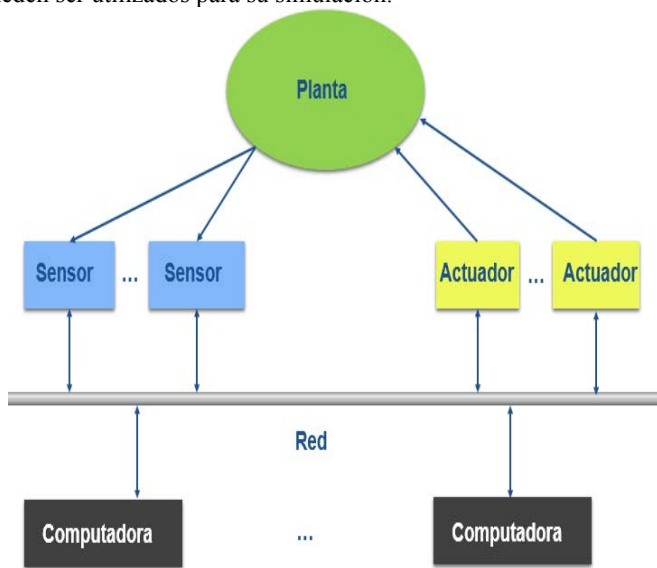


Figura 1: Estructura general de un SCR.

Para el tratamiento de las demoras y las pérdidas de paquetes en los sistemas de control en red inalámbrica se utilizan también los modelos de control predictivo, el diseño de un SRC con modelo de control predictivo redes inalámbricas permite

mejorar la calidad del canal inalámbrico y utilizando una comunicación cooperativa, para el control de acceso al medio del protocolo COMAC (Cooperative MAC) por sus siglas en inglés debido a su baja complejidad y las bondades que brinda en ahorro de energía (Ulusoy, A, Gurbuz, O, Onat, A, 2010). También para la implementación de controladores con modelos de control predictivo se utilizan un algoritmos de disparo por tiempo los cuales permite un buen comportamiento antes las demoras y las pérdidas de paquetes de la red (Onat. A, Teoman. A Parlakay, 2008).

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 (Goswami. D, Schneider. R, Chakraborty. S, 2011). 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. (Hirche. S, Matiakis. T, Buss, 2009).

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 perdidas de datos en la red y las restricciones físicas de los actuadores del sistema (Cao.X, Cheng P, Chen J, Sun Y, 2013).

3.2. Sistemas de control basados en eventos

El control basado en eventos es un medio para la reducción de los tiempos en la 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 con la ocurrencia de eventos que propicien que sean excedidos 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.

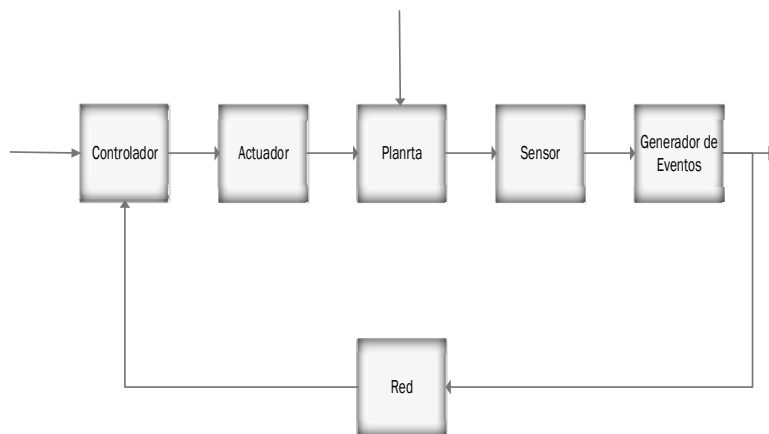


Figura 2: Estructura de un sistema de control basado en eventos.

Una de las principales aplicaciones del control basado en eventos se puede ver en las redes inalámbricas de sensores

(WSN), esta consiste de una colección de sensores y actuadores conectados a través de un medio inalámbrico, debido a las limitaciones de ancho de banda que posee y además todos los nodos que la conforman utilizan baterías.

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 (Araujo J, Mazo M, Anta A, Tabuada P, Johansson KH). También propicia la disminución el consumo de energía global del sistema a través de la disminución de la frecuencia de actuación del sistema (Mazo. M, Tabuada. P).

El diseño de controladores descentralizados con disparo por eventos permite tanto para sistema lineales y no lineales garantizar la capacidad de asimilar las demoras de la red y la pérdida de paquetes, para los sistemas lineales se puede usar un controlador con realimentación que sea capaz de asegurar la estabilidad del sistema mientras que para no lineales a través de matrices de inecuaciones lineales puede obtenerse (Guinaldo. M, Lehmann. D, Sánchez. J, Dormido. S, Johansson K. H, 2012).

Otra técnica ampliamente utilizada el diseño de algoritmos de control de disparo por eventos para SCR distribuidos es la utilización de variables de umbrales obteniéndose un ahorro considerable en el consumo de energía del sistema (Postoyan. R, Tabuada. P, Nešić. D, Anta, 2011).

Aunque el control basado en eventos no es una metodología nueva ha tomado gran auge en la actualidad debido a sus aplicaciones en sistemas de control asincrónicos, mediciones y control en tiempo real, pese a esto todavía quedan temas a desarrollar como por ejemplo las posibles topologías a utilizar, como definir los eventos, que información transmitir, entre otras muchas.

3.3. Sistemas de control distribuido

Los sistemas de control distribuido (SCD) son sistemas multiestación en los cuales sus elementos se encuentran distribuidos a lo largo de todo el área en donde componente o sub-sistema controlado está compuesto por uno o más controladores. Todo el sistema de los controladores está conectado mediante redes de comunicación y de monitorización.

Las principales características los SCD se encuentran 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 (HYCON2 2011). Comparados con los sistemas centralizados los SCD 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 SCD se debe determinar una estructura de control la cual asigne entradas del sistema a un conjunto de controladores que se encarguen únicamente de observar salidas locales. 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 SCD es la tolerancia a fallos debido a la posibilidad de la redundancia de controladores y conexiones, también como aspecto importante tenemos la posibilidad que tiene 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 podemos ver la estructura típica de un SCD.

El modelo de control predictivo (MPC) es una técnica ampliamente usada en la creación de controles distribuidos, entre los que encontramos: el modelo de control predictivo distribuido (DMPC por sus siglas en inglés) no cooperativo, que puede ser clasificado en secuencial, iterativo o basado en negociaciones (Christofides PD, Scattolini R, Muñoz de la Peña D, Liu J, 2013). La utilización del control predictivo iterativo brinda la capacidad de asimilar demoras asincrónicas en la realimentación (Liu, J., Chen, X., Muñoz de la Peña, D., Christofides, P. D, 2012). El control predictivo distribuido para sistemas discretos, con algoritmo no cooperativo posibilita también obtener una buenas estabilidad y precisión en el control (Farina. M, Scattolini. R, 2012).

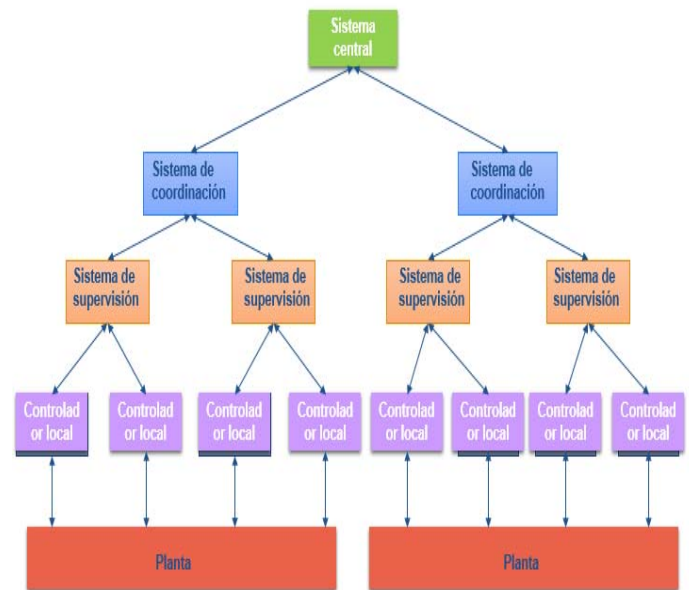


Figura 2: Estructura típica de un SCD.

Los sistemas de control distribuido con modelo de control predictivo basados en controladores de Lyapunov para sistemas no lineales permiten soportar las demoras asincrónicas introducidas por las mediciones (Liu. J, Chen. X, Muñoz de la Peña. D, Christofides. P, 2010). El modelo de control predictivo cooperativo basado negociación de agentes brinda grandes potenciales sobre todo garantizando la estabilidad del sistema debido a que en cada periodo de muestreo los agentes que componen el sistema negocian una solución de forma cooperativa (Maestre. J, M Muñoz de la Peña. D, Camacho. E. F, Alamo. T, 2011).

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 alcanzar buenos niveles de exactitud en procesos complejos (Chen, X., Heidarinejad, M, Liu, J, Muñoz de la Peña. D, Christofides. P. D, 2011). El uso de algoritmos distribuido de estimación de estados con MPC permiten reducir los requerimientos de la red en una arquitectura SCR demostrando que la utilización de un protocolo de comunicación basado en eventos mejora la estabilidad del sistema (Trimpe. S, D'Andrea. R, 2011).

La variación de parámetros lineales (VLP) es otra técnica aplicada en el control distribuido a sistemas ciberfísicos, en (Hoffmann.C, Eichler. A, Werner. H, 2013) se puede detallar su aplicación, en donde se obtienen controladores VPL para sistema multiagentes mostrándose la gran estabilidad de su desempeño.

3.4. Sistemas de control basado 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 demoras, 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 aplicado sistema conmutados pasivo posibilita gran estabilidad (McCourt. M. J. P. J, 2010 a) . La utilización de enfoques disipativos como el método de la velocidad cuadrática de alimentación permiten la compensación de demoras de la red en sistemas conmutados (McCourt. M. J, Antsaklis. P. J, 2013). Los sistemas pasivos aplicados en el diseño de controladores para SCR permiten mitigar los efectos de las demoras de la red y las pérdidas de paquetes (Kottenstette N, Hall JF, Koutsoukos X, Sztipanovits J, Antsaklis P, 2013) (Kottenstette. N, Koutsoukos. X, Hall. J, Sztipanovits. J, Antsaklis. P, 2008).

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. (Wang. Y, Gupta. V, Antsaklis. P.J, 2012).

Los índices pasivos también son una alternativa para los métodos de caracterización de la disipación de energía en los sistemas puesto que permite diseñar realimentaciones estables a sistemas no pasivos. La determinación de los índices pasivos permite que muchos más sistemas puedan ser analizados utilizando resultados similares al teorema de pasividad. (McCourt M. J, Antsaklis. P. J, 2010 b). Esos pueden ser aplicados a sistemas lineales y no lineales multiagentes (Wu. P, Antsaklis. P. J, 2011). 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 por (Wu. P, McCourt. M.J, Antsaklis. P.J, 2013) en el cual se hace uso del método numérico de Hooke maximizar los índices.

4. Conclusiones

En este artículo se expone los conceptos básicos a cerca de los SCF 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 y el control basado en pasividad citándose ejemplos reportados en la literatura científica evidenciándose que aunque se aboga por un amplio uso de los SCF las metodologías de control aún están en crecimiento y precisan de un mayor desarrollo para lograr los resultados que se esperan y

que sin duda alguna forman parte del presente y el futuro del desarrollo de los de la industria moderna.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la Universidad Autónoma de Madrid en el marco de la iniciativa bilateral con UMCC para actividades de investigación. Además, los autores agradecen el apoyo brindado por el proyecto IoSENSE: Flexible FE/BE Sensor “Pilot Line for the Internet of Everything”, financiado por “Electronic Component Systems for European Leadership Joint (ECSEL) Undertaking” en virtud del acuerdo 692480.

Referencias

- Antsaklis PJ, Goodwine B, Gupta V, McCourt MJ, Wang Y, Wu P, et al. Control of cyberphysical systems using passivity and dissipativity based methods. *European Journal of Control*. 2013;19(5):379-88.
- Araujo J, Mazo M, Anta A, Tabuada P, Johansson KH. System architectures, protocols and algorithms for aperiodic wireless control systems. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2014;10(1):175-84.
- Colombo A. W., Bangemann T., Karnouskos S., Delsing J., Stluka P., R. Harrison, F. Jammes, and J. L. M. Lastra, Industrial cloud-based cyber-physical systems: The IMC-AESOP approach vol. 9783319056241, 2014.
- Beruvides, G., Quiza, R., & Haber, R. E. (2016). Multi-objective optimization based on an improved cross-entropy method. A case study of a micro-scale manufacturing process. *Information Sciences*, 334-335, 161-173. doi:10.1016/j.ins.2015.11.040
- Baheti R, Gill H. Cyber-physical Systems. In: Samad T, Annaswamy AM, editors. *The Impact of Control Technology*. available at www.ieeeccs.org; IEEE Control Systems Society; 2011. p. 175-83.
- Cao X, Cheng P, Chen J, Sun Y. An online optimization approach for control and communication codesign in networked cyber-physical systems. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2013; 9(1):439-50.
- Chen, X., Heidarinejad, M, Liu, J, Muñoz de la Peña, D, Christofides. P. D. Model predictive control of nonlinear singularly perturbed systems: Application to a large-scale process network. *Journal of Process Control*, 21, 1296–1305. (2011).
- Christofides PD, Scattolini R, Muñoz de la Peña D, Liu J. Distributed model predictive control: A tutorial review and future research directions. *Computers and Chemical Engineering*. 2013;(1)51:21-4.
- D'Ambrosio. J. CPS and the Automotive Industry. NIST Foundations for Innovation in Cyber-Physical Systems Workshop. 2013
- Davis. J. Smart Manufacturing Leadership Coalition. A Smart Manufacturing Public-Private Partnership Program. (Los Angeles: University of California – Los Angeles, January 2011).
- Farina, M., Scattolini, R. Distributed predictive control: A non-cooperative algorithm with neighbor-to-neighbor communication for linear systems. *Automatica*, 48, 1088–1096 (2012).
- Ferrer B, Ramis and Martinez Lastra J. L a., "Private local automation clouds built by CPS: Potential and challenges for distributed reasoning," *Advanced Engineering Informatics*, vol. 32, pp. 113-125, 2017 /04/01/2017.
- Ferrer B. R. and M. Lastra J. L b., "An architecture for implementing private local automation clouds built by CPS," in *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2017, pp. 5406-5413.
- Frazzon EM, Hartmann J, Makuschewitz T, Scholz-Reiter B, editors. *Towards socio-cyber-physical systems in production networks2013*; Setubal.
- Frechette. S. *Systems Integration for Manufacturing and Construction Applications* (Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology, September 2011).
- Goswami. D, Schneider. R, Chakraborty. S. Co-design of Cyber-Physical Systems via Controllers with Flexible Delay Constraints. *Design Automation Conference (ASP-DAC)*, 2011 16th Asia and South Pacific.
- Guinaldo. M, Lehmann. D, Sánchez. J, Dormido. S, Johansson K. H. Distributed event-triggered control with network delays and packet losses. *Decision and Control (CDC)*, 2012 IEEE 51st Annual Conference.

- Haber-Guerra, R. E., Haber-Haber, Andr  s, D.M., Alique, A. (2008). Networked fuzzy control system for a high-performance drilling process. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 130(3), 0310091-0310096. doi:10.1115/1.2783280
- Haber, R. E., Juanes, C., Del Toro, R., & Beruvides, G. (2015). Artificial cognitive control with self-x capabilities: A case study of a micro-manufacturing process. *Computers in Industry*, 74, 135-150. doi:10.1016/j.compind.2015.05.001
- Haber, R. E., Alique, J. R., Alique, A., & Haber, R. H. (2005). Controlling a complex electromechanical process on the basis of a neurofuzzy approach. *Future Generation Computer Systems*, 21(7), 1083-1095. doi:10.1016/j.future.2004.03.008
- Hirche, S., Matiakis, T., Buss, T. A distributed controller approach for delay-independent stability of networked control systems. *Automatica* 45 (2009) 1828-1836.
- Hoffmann, C., Eichler, A., Werner, H. Distributed Control of Linear Parameter-Varying Decomposable Systems. *American Control Conference (ACC)*, 2013.
- Hasan, S. M., Yu, H., Carrington, A. Overview of Wireless Networked Control Systems over Mobile Ad-hoc Network. *Proceedings of the 14th International Conference on Automation & Computing*, Brunel University, West London, UK, 6 September 2008.
- HYCON2. *Systems and Control. Recommendations for a European Research Agenda towards Horizon 2020*, 2011.
- Jamshidi MM, editor Sustainable energy systems: Cyber-physical based intelligent management of micro-grids. *Logistics and Industrial Informatics (LINDI)*, 2012 4th IEEE International Symposium on; 2012 5-7 Sept. 2012.
- Kim KD, Kumar PR. Cyber-physical systems: A perspective at the centennial. *Proceedings of the IEEE*. 2012;100(SPL CONTENT):1287-308.
- Kottenstette N, Hall JF, Koutsoukos X, Sztipanovits J, Antsaklis P. Design of networked control systems using passivity. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2013;21(3):649-65.
- Kottenstette, N., Koutsoukos, X., Hall, J., Sztipanovits, J., Antsaklis, P. Passivity-Based Design of Wireless Networked Control Systems Subject to Time-Varying Delays. *Technical report. Institute for Software Integrated Systems Vanderbilt University Nashville, Tennessee. Rep. ISIS-08-904*, 2008.
- Liu, J., Chen, X., Muñoz de la Peña, D., Christofides, P. D. Distributed model predictive control of nonlinear systems subject to asynchronous and delayed measurements. *Automatica*, 46, 52–61. (2010)
- Liu, J., Chen, X., Muñoz de la Peña, D., Christofides, P. D. Iterative distributed model predictive control of nonlinear systems: Handling asynchronous, delayed measurements. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 57, 528–534 (2012).
- Maestre, J., M Muñoz de la Peña, D., Camacho, E. F., Alamo, T. Distributed model predictive control based on agent negotiation. *Journal of Process Control*, 21, 685–697. (2011).
- Manjili YS, Rajae A, Jamshidi M, Kelley BT, editors. Fuzzy control of electricity storage unit for Energy Management of Micro-Grids2012; Puerto Vallarta.
- Mazo, M., Tabuada, P. Decentralized event-triggered control over wireless sensor/actuator networks. *Automatic Control, IEEE Transactions on*, vol. 56, no. 10, pp. 2456–2461, oct. 2011.
- McCourt, M. J., Antsaklis, P. J. Stability of Networked Passive Switched Systems. *49th IEEE Conference on Decision and Control*. December 15-17, 2010 a.
- McCourt, M. J., Antsaklis, P. J. Control Design for Switched Systems Using Passivity Indices. *American Control Conference Marriott Waterfront, Baltimore, MD, USA*. 2010 b.
- McCourt, M. J., Antsaklis, P. J. Control of Networked Switched Systems using Passivity and Dissipativity. *Automatisierungstechnik – 2013*.
- M. R  fmann, M. Lorenz, P. Gerbert, M. Waldner, J. Justus, P. Engel, and M. Harnisch, "Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries," *Boston Consulting Group*, vol. 9, 2015
- Neogi, N, Safety and reliability in automotive cyber-physical systems, in: *Proc. National Workshop on High Confidence Automotive Cyber-Physical Systems*, 2008.
- (NIST) NIoSaT. *Cyber-Physical Systems: Situation Analysis of Current Trends, Technologies, and Challenges*. USA: 2012.
- Onat, A., Teoman, A. Parlakay, N.E. Model Based Predictive Networked Control Systems. *Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control Seoul, Korea, July 6-11, 2008*.
- Onat, A., Teoman, A. Parlakay, N.E. Model Based Predictive Networked Control Systems. *Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control Seoul, Korea, July 6-11, 2008*.
- Park KJ, Zheng R, Liu X. Cyber-physical systems: Milestones and research challenges. *Computer Communications*. 2012;36(1):1-7.
- Postoyan, R., Tabuada, P., Ne  si  c, D., Anta, Event-triggered and self-triggered stabilization of distributed networked control systems. *Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC)*, 2011 50th IEEE Conference on Orlando, FL, USA.
- Sahraei Manjili Y, Rajae A, Jamshidi M, Kelley BT, editors. *Intelligent decision making for energy management in microgrids with air pollution reduction policy2012*; Genova.
- Samad T, Parisini T. Systems of Systems. In: Samad T, Annaswamy AM, editors. *The Impact of Control Technology*. available at www.ieeeccs.org: IEEE Control Systems Society; 2011. p. 175-83.
- Stewart, B., T. Venkat. A. N, Rawlings. J. B, Wright. S. J, Pannocchia, G. Cooperative distributed model predictive control. *Systems and Control Letters*, 59, 460–469. (2010).
- Tiwari, A, Analysis challenges for automotive CPS, in: *Proceedings of National Workshop on High Confidence Automotive Cyber-Physical Systems*, 2008
- Trimpe, S, D'Andrea, R. An Experimental Demonstration of a Distributed and Event-Based State Estimation Algorithm. *18th IFAC World Congress*, 2011.
- Ulusoy, A., Gurbuz, O., Onat, A. Wireless Model Based Predictive Networked Control System Over Cooperative Wireless Network. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 7, no. 1, month 2010.
- Villalonga, A., Beruvides, G., Castaño, F., & Haber, R. (2018a, June 13 2018-June 18 1 2018). Condition-Based Monitoring Architecture for CNC Machine Tools Based on Global Knowledge. Paper presented at the INCOM 2018 - 16th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing.
- Villalonga, A., Beruvides, G., Castaño, F., & Haber, R. (2018b, May 15 2018-May 18 1 2018). Industrial Cyber-Physical System for Condition-based Monitoring in Manufacturing Processes. Paper presented at the ICPS 2018 - 1st. International Conference on Industrial Cyber Physical Systems.
- Wang, X, Lemmon, M. D. Event-Triggering in Distributed Networked Control Systems. *Automatic Control, IEEE Transactions on*, vol. 56, no. 3, pp. 586–601, march 2011.
- Wang, Y, Gupta, V, Antsaklis, P.J. Passivity Analysis for Discrete-Time Periodically Controlled Nonlinear Systems, *ISIS Technical Report ISIS-2012-003*, March 2012.
- Wu, P, McCourt, M.J, Antsaklis, P.J, Experimentally Determining Passivity Indices: Theory and Simulation, *ISIS Technical Report, isis-2013-002*, University of Notre Dame, 2013.
- Wu, P, Antsaklis, P. J. Passivity Indices for Symmetrically Interconnected Distributed Systems. *19th Mediterranean Conference on Control and Automation*. 2011.
- Zhou K, Ye C, Wan J, Liu B, Liang L, editors. *Advanced control technologies in cyber-physical system2013*; Hangzhou, Zhejiang.