

# SISTEMA CIBERFISICOS: PRINCIPALES ESTRATEGIAS DE CONTROL Y SUS APLICACIONES EN LA MECÁNICA

Ing. Alberto Villalonga<sup>1</sup>

1. Universidad de Matanzas – Sede “Camilo Cienfuegos”, Vía Blanca Km.3 ½ , Matanzas, Cuba. [alberto.villalonga@umcc.cu](mailto:alberto.villalonga@umcc.cu)



---

CD de Monografías 2016  
(c) 2016, Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”  
ISBN: XXX-XXX-XX-XXXX-X

## Resumen

Los sistemas ciberfísicos (SCF) son la nueva generación de sistemas inteligentes, que se caracterizan por conferirle mayor importancia a la interacción entre los procesos físico y los componentes computacionales que sus predecesores. En este trabajo se aborda acerca de los conceptos básicos de los SCF, se presentan las principales metodologías de control que son utilizadas para su diseño, así como sus aplicaciones a la manufactura flexible, la generación de energía y los automóviles.

**Palabras claves:** *Sistemas ciberfísicos, Control en red, Control basado en eventos, Control distribuido, Control basado en pasividad, Manufactura flexible, Generación de energía, Industria automovilística.*

---

## Introducción

Los sistemas embebidos son sistemas computacionales diseñados para la realización de una o varias funciones dedicadas, los cuales son empleados en diversas aplicaciones tales como teléfonos inteligentes, reproductores mp3, sistemas de radares de aviones, el control de grandes fábricas, entre otras muchas.

En la actualidad el gran desarrollo de las tecnologías de la informática y la comunicación, así como la convergencia entre los espacios físicos y cibernéticos han transformado los sistemas embebidos tradicionales en sistemas ciberfísicos (SCF), los cuales son caracterizados por la estrecha integración y coordinación existente entre los procesos físicos y computacionales a través de la comunicación en red entre los mismos (Park et al, 2012).

Los sistemas ciberfísicos son la siguiente generación de sistemas inteligentes, realizan medición, computo, control distribuido sobre redes de comunicación alámbricas o inalámbricas, optimización y ejecutan algoritmos del alto nivel de toma de decisiones. Han surgido como un importante paradigma de investigación en donde confluyen el control, las comunicaciones y la computación.

Las aplicaciones de los sistemas ciberfísicos abarcan un amplio margen por ejemplo la industria de la aeronáutica, la transportación, la automatización, la medicina, la manufactura, entre otras (Baheti y Gill, 2011). Dada las numerosas aplicaciones, el incremento de la complejidad en los requerimientos de control en los sistemas ciberfísicos y los grandes avances tecnológicos ha sido también necesario el surgimiento de tecnologías de control capaces de interactuar con estas nuevas y complejas dinámicas.



## **Generalidades de los SCF**

Aunque sea hace difícil realizar una definición exacta de los sistemas ciberfísicos en general 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 y Kumar , 2012). No basta simplemente con dominar las características del medio físico y conocer los elementos del sistema computacional sino se debe comprender la dinámica que se genera de la intercepción de ambos.

Los SCF han surgido con la expectativa de superar a sus predecesores logrando una mayor eficiencia, seguridad, escalabilidad, sostenibilidad, adaptabilidad y robustez lo que propiciaría la creación de sistemas con respuestas más rápidas, precisa, confiables y eficientes. Entre las ventajas que nos pueden brindar podemos encontrar: la creación de sistema de transporte que debido a su rapidez de respuesta pueden posibilitar evitar numerosos accidentes de tráfico, redes energéticas con mayor eficiencia, robots que puedan realizar cirugías con mayor precisión, líneas de manufactura que darían como resultados productos de mejor calidad y una producción con más eficiencia.

Los SCF son esencialmente heterogéneos no solo en término de sus componentes sino también en términos de requerimientos de diseño. Además de sus propiedades funcionales, los SCF están sujetos a un amplio rango de requerimientos físicos tales como dinámica, alimentación, tamaño físico, tolerancia a fallos y en adición a requerimientos de sistema tales como seguridad (Kottenstette et al, 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 abriendo paso a nuevos campos para la investigación (Frazzon et al, 2013) y retos tecnológicos tales como abstracción de sistemas en tiempo real, modelación y control de sistemas híbridos, control sobre redes, redes de sensores y actuadores, simulación, verificación y validación.

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 ambiente.

## **Metodologías de control**

El uso de los SCF cada día crece más en el mundo sin embargo las técnicas de control utilizadas para su diseño se encuentran en desarrollo puesto que los mismos SCF se encuentran aún en fase de surgimiento. Entre las principales metodologías para el diseño de los mismos encontramos el control en red, el control basado en eventos, el control distribuido y el control basado en pasividad.

### **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 et al, 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 SCR 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. En (Araujo et al, 2013) se diseña la arquitectura de un sistema de control inalámbrico para la implementación práctica de un SCR el cual garantice la estabilidad de la planta soportando demoras en la comunicación y la pérdida de datos además de garantizar un mínimo consumo de energía y uso adecuado del ancho de banda de la red. En (Hasan et al, 2008) se muestra una guía para el diseño efectivo de un sistema de control en red inalámbrica, aunque en este no se tienen en cuenta ni las demoras de la red ni la pérdida de paquetes, además se repasan 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.

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 en una red inalámbrica se presenta en (Ulusoy et al, 2010), en el cual para mejorar la calidad del canal inalámbrico se utiliza una comunicación cooperativa, para el control de acceso al medio un protocolo conocido como COMAC (Cooperative MAC) por sus siglas en inglés debido a su baja complejidad y las bondades que brinda en ahorro de energía; en (Onat y Parlakay, 2008) se realiza el diseño de un SRC con un controlador con modelo de control predictivo el cual permite un buen comportamiento antes las demoras y las pérdidas de paquetes de la red, para el control se utiliza un algoritmo de disparo por tiempo.



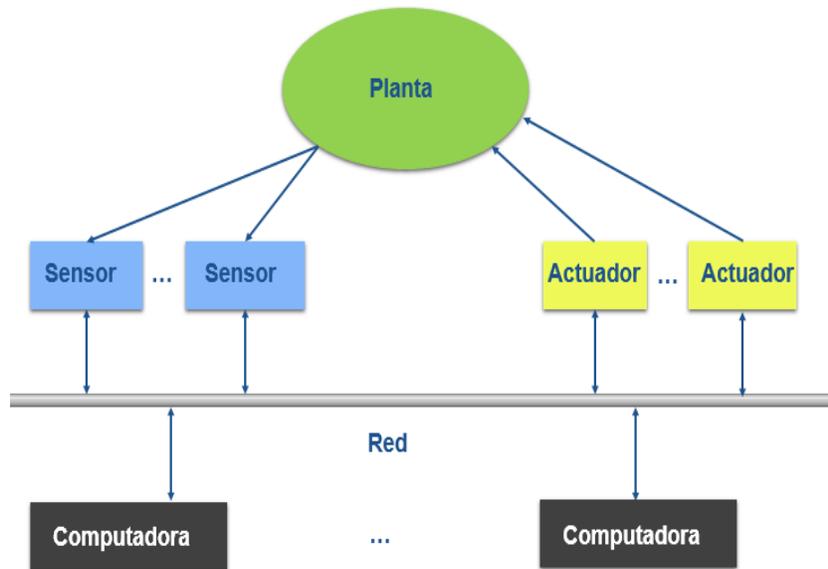


Figura 1: Estructura general de un SCR.

Los controles distribuidos son igualmente muy utilizados en los SRC, en (Goswami et al, 2011) se muestra el diseño de un sistema distribuido de control de conjunto con un protocolo de comunicación que garantiza la estabilidad de un SCR además de permitir una mayor flexibilidad en cuanto a las demoras de la comunicación, en (Hirche et al, 2009) se expone el desarrollo de un controlador distribuido para un SRC que permite la independencia de las demoras de la red, para ello se hace uso de transformaciones lineales de las entradas y las salidas de la planta.

Las técnicas de optimización son muy aplicadas a los SCR, en (Cao et al, 2013) se presenta un protocolo de comunicación para el control en línea y un algoritmo de optimización basado en el algoritmo del recocido simulado en el cual se tienen en cuenta las posibles pérdidas de datos en la red y las restricciones físicas de los actuadores

El análisis pasivo es otra metodología muy utilizada en la construcción de SRC, en (Kottenstette et al, 2013) se muestra el diseño de un SCR, que puede tolerar perdidas de paquetes y demoras de la red, basado en la utilización de un controlador pasivo.

### Control basado 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.

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.

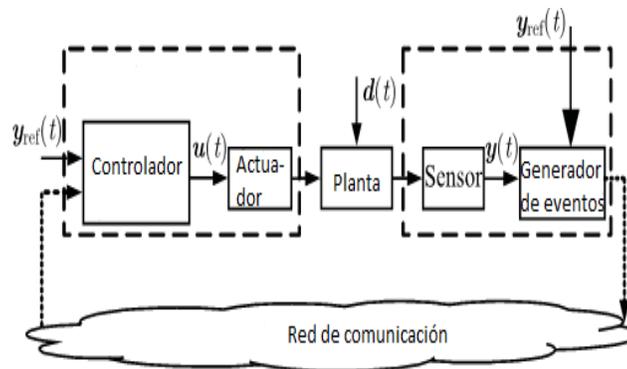


Figura 2: Estructura de un sistema de control basado en eventos.

Se muestra en (Araujo et al, 2014) el diseño de un algoritmo basado en eventos, para la comunicación asincrónica de un SCR con el objetivo de 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. En (Mazo y Tabuada, 2011) se presentan estrategias para la implementación de un control descentralizado disparado por eventos sobre un sistema de control en red inalámbrica, en este no se tiene en cuenta ni las pérdidas de paquetes ni las demoras de la red solo se centra en la disminución de la frecuencia de actuación del sistema. En (Guinaldo et al, 2012) se muestra el diseño de controladores descentralizados con disparo por eventos en un sistema de control en red para sistema lineales y no lineales que son capaces de asimilar las demoras de la red y la pérdida de paquetes, para los sistemas lineales se usa un controlador con realimentación que sea capaz de asegurar la estabilidad del sistema mientras que para no lineales se hace a través de una matriz lineal de inecuaciones. En (Postoyan et al, 2011) encontramos el diseño de algoritmos de control de disparo por eventos



para SCR distribuidos, se exponen dos formas básicas para el diseño del control basado en eventos la utilización como variable del umbral o del reloj. En (Wang y Lemmon., 2011) se realiza el análisis y diseño de un sistema de control distribuido con control basado en eventos que es capaz de asimilar las demoras de la red y la pérdida de paquetes, se discuten dos protocolos para la comunicación diferenciándose ambos en la utilización de las señales de control para gestionar la transmisión.

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.

### **Control distribuido**

Los sistemas de control distribuido (SCD) son sistemas de control multiestación en los cuales sus elementos se encuentran distribuidos a lo largo de todo el sistema con cada componente o sub-sistema controlado 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. 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 solamente 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 proporciona 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, en (Christofides et al, 2013) se puede encontrar un análisis teórico de las principales herramientas para el diseño de sistema de control distribuido con MPC mostrándose a detalle los algoritmos expuestos pudiéndose determinar sus principales ventajas y desventajas mostrándose así claridad en sus aplicaciones lo que permite detectar en cada escenario que algoritmo brindará mejor rendimiento, entre los algoritmos analizados tenemos: el modelo de control predictivo distribuido (DMPC por sus siglas en inglés) no cooperativo, el DMCP cooperativo que puede ser clasificado en secuencial, iterativo o basado



en negociaciones. En (Liu et al, 2012) se realiza el diseño de un control distribuido con un modelo de control predictivo iterativo capaz de asimilar demoras asincrónicas en la realimentación, los controladores son diseñados a través del método de Lyapunov. En (Farina y Scattolini, 2012) se propone un control predictivo distribuido para sistemas discretos, con algoritmo no cooperativo, en el cual en cada período de muestreo cada agente envía información sobre su trayectoria de referencia a sus vecinos garantizando que su trayectoria actual quede entrelazada. En (Liu et al, 2010) se diseña un control distribuido con modelo de control predictivo basados en controladores de Lyapunov para sistemas no lineales que permitan soportar las demoras asincrónicas introducidas por las mediciones. En (Maestre et al, 2011) se propone un control distribuido con modelo de control predictivo cooperativo basado negociación de agentes en el cual en cada periodo de muestreo los agentes que componen el sistema negocian una solución de forma cooperativa. En (Chen et al, 2011) se muestra un DMPC para sistemas no lineales con perturbaciones singulares, para ello se realiza la separación de las variables del sistema en rápida y lentas, para el control de las variables con dinámicas rápidas se utiliza un controlador convencional y para las variables lentas un MPC con controladores de Lyapunov. En (Stewart et al, 2010) se exponen las ventajas de los DMPC cooperativos mostrándose sus principales algoritmos y la estabilidad de los mismos. En (Trimpe y D’Andrea, 2011) se diseña un algoritmo distribuido de estimación de estados que hace uso de un MPC para reducir los requerimientos de la red en una arquitectura SCR demostrándose experimentalmente que la utilización de un protocolo de comunicación basado en eventos mejora la estabilidad del sistema.

La variación de parámetros lineales (VLP) es otra técnica aplicada en el control distribuido, en (Hoffmann et al, 2013) se puede ver su aplicación, en donde se obtienen controladores VPL para sistema multiagentes y se demuestra la estabilidad de su desempeño.

### **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.



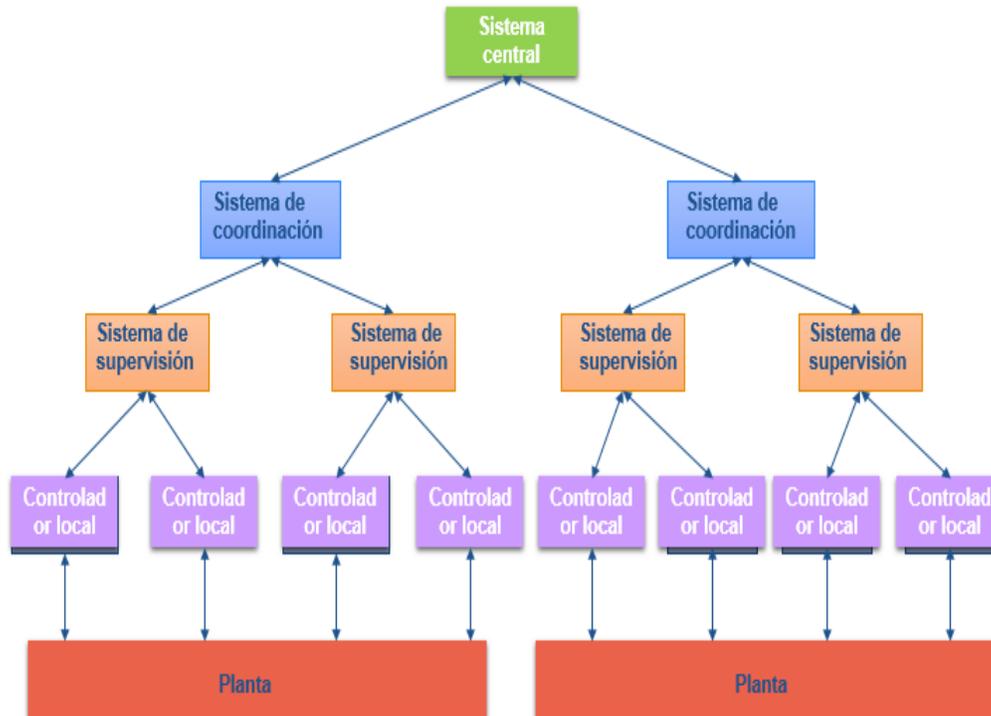


Figura 3: Estructura típica de un SCD.

La utilización de la transformación de las variables de onda para el control y el análisis de la estabilidad se puede ver en (McCourt y Antsaklis, 2010 a) en donde se aplica a un sistema conmutado pasivo. En (McCourt y Antsaklis., 2013) se ve también el uso de métodos pasivos para la compensación de demoras de la red en sistemas conmutados a través de la utilización de enfoques disipativos como el método de la velocidad cuadrática de alimentación. Se realiza el diseño de un controlador pasivo para un sistema de control en red en (Kottenstette et al, 2013) (Kottenstette et al, 2008), donde los efectos de las demoras de la red y las pérdidas de paquetes son contrarrestados por las características del sistema pasivo propuesto además del uso también de la transformación de la variable de onda. En (Antsaklis et al, 2013) se exponen las principales características y los métodos teóricos básicos del CBP para su aplicación a los SCF manifestándose que es una metodología prometedora para el diseño de los mismos.

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, en (Wang et al, 2012) se muestra el diseño de un sistema de control para sistemas no lineales no pasivos en lazo abierto, en el cual debido a la complejidad de los sistemas no lineales se requiere la aplicación de la realimentación de forma periódica basada en la dinámica cero del sistema para asegurar su pasividad.



Los índices pasivos 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. Se puede ver la utilización de los mismos para el control de sistemas conmutados o lineales en (McCourt y Antsaklis, 2010 b), así como su aplicación a sistemas lineales y no lineales multiagentes en Wu y Antsaklis, 2011) donde para los sistemas lineales los índices pasivos son explícitamente caracterizados mientras que para los no lineales se utiliza un conjunto de matrices de desigualdades. En (Wu et al, 2013) se presenta un método experimental para la determinación de los índices pasivos, proponiéndose en el mismo la utilización del método numérico de Hooke y (buscar) para maximizar los índices.

## **Aplicaciones de los SCF en sistemas mecánicos**

Los SCF poseen una amplia aplicación en los sistemas de ingeniería moderna. Los sistemas electromecánicos no son la excepción y entre ellos se destacan los sistemas de manufactura flexible, los sistemas de generación de energía eléctrica y los automóviles.

### **Manufactura flexible**

Los sistemas ciberfísicos poseen una gran aplicación en la manufactura flexible puesto que propician el intercambio a gran escala de sistemas heterogéneos que integran a los sistemas computacionales con los procesos de producción. Estos sistemas propician el control independiente de cada proceso a través de lazos de control que interactúan con los procesos a lo largo de la línea de producción. Esta red de producción altamente integrada brinda un gran aumento de la eficiencia.

Uno de los principales retos en la manufactura es el incremento en los niveles de automatización de los procesos, así como la utilización de las nuevas tecnologías de la informática y las comunicaciones. La computación y la comunicación digital aumentan cada día más en las plantas de manufactura permitiendo la adopción de nuevas técnicas y tecnologías. El uso de la simulación, la optimización, además de otras herramientas inteligentes traen consigo una mayor eficiencia e integración entre los sistemas.

La utilización de robots realizando tareas sin la necesidad de la asistencia humana, máquinas herramientas y equipamientos controlados por computadoras se vuelven cada vez más comunes en los procesos de manufactura inteligente. La tendencia al uso de sistemas automáticos modulares, compuestos por componentes ciberfísicos modulares, permite la creación de sistemas que poseen mayor posibilidad de reconfiguración y la realización de diseños más personalizados. La ciencia y la tecnología de los SCF proporcionan muchas posibilidades de innovación y desarrollo. En (Davis, 2011) y (Frechette, 2011) se puede constatar el aumento de la tendencia hacia la manufactura inteligente donde los SCF juegan cada día un papel de mayor importancia.



En un futuro se aboga por lograr procesos de manufacturas más integrados e inteligentes con producciones más eficientes, la utilización de sistemas robóticos que puedan trabajar con mayor seguridad y compartir de manera más amigable procesos con las personas, la impresión guiada por computadoras, entre otros avances que propicien que los procesos de manufactura flexibles sean más seguros y eficientes.

### **Sistemas de generación de energía eléctrica**

Los SCF tienen un significativo impacto en sistemas distribuidos tales como los sistemas de generación de energía eléctrica, su utilización puede ayudar a estos a convertirse en sistemas más inteligentes y eficientes.

La necesidad de mejoras en la eficiencia de generación de energía eléctrica ha traído consigo el desarrollo de investigaciones en nuevos campos. La aplicación de los SCF en la incorporación de nuevas formas de generación como las fuentes renovables permite la creación de redes heterogéneas con una mejor integración, control y supervisión de la misma. Un incremento en la interacción entre los elementos del sistema a través de la implementación de SCF y el uso de otras tecnologías reduce el consumo y las pérdidas de energía en la generación. Otra prioridad es la protección y detección fallas por ello se hace necesario el diseño de un sistema robusto mediante la introducción de controles en tiempo real en composición con elementos físicos y computacionales. En (Jamshidi, 2012) (Manjili et al, 2012) (Sahraei et al, 2012) se muestran ejemplos de la aplicación de los SCF a la generación de energía y las redes de distribución.

Las tecnologías de los SCF proporcionarán la nueva generación de arquitecturas y plataformas de control necesarios para la optimización y la seguridad, obteniéndose así tecnologías altamente integradas y flexibles para los futuros sistemas de generación.

### **Industria automovilística**

Los automóviles de hoy distan mucho de aquellas máquinas puramente mecánicas. En un automóvil moderno podemos encontrar de 30 a 90 procesadores formando parte de una red de subsistemas de control tales como advertencia de colisión, despliegue de bolsas de aire, tracción, estabilidad, que le proporciona al chofer información acerca de la velocidad, la aceleración, la tracción, datos valiosos para la navegación.

La industria del automóvil en los últimos años se ha nutrido de los SCF permitiendo avances en la seguridad, el confort, la economía en el consumo del combustible y las emisiones de contaminantes (Samad y Parisini, 2011)

En la actualidad los automóviles no solo poseen una red de comunicación para el funcionamiento interno de sus sistemas, sino que pueden comunicarse también con otros vehículos permitiendo así alcanzar nuevos niveles de seguridad, también propiciando su integración con sistemas inteligentes de transportes lo que brindaría la oportunidad de reducir



los accidentes de tráfico y las congestiones. En (Neogi., 2008) (Tiwari., 2008) (D' Ambrosio, 2013) se observa como los avances tecnológicos en especial los SCF ha influenciado de gran manera en el gran desarrollo de la industria automovilística en nuestros días.

## Conclusiones

Se abordo acerca de los conceptos de los SCF, se realizó una revisión de las principales metodologías de control que son utilizadas en los SCF como son el control en red, el control basado en eventos, el control distribuido y el control basado en pasividad citándose algunos ejemplos que se pueden encontrar en la bibliografía y por último se exponen aplicaciones de los SCF en tres importantes sistemas electromecánicos 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 lo resultados que se desean y que estos sin duda alguna forman parte del presente y el futuro del desarrollo de los sistemas electromecánicos y del mundo tecnológico en general.



## Bibliografía

- ANTSAKLIS P.J; 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.
- BAHETI R, GILL H. Cyber-physical Systems. In: Samad T, Annaswamy AM, editors. *The Impact of Control Technology*, 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 of 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*. 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).
- FRAZZON, E.M, HARTMANN J, MAKUSCHEWITZ T, SCHOLZ-REITER B, editors. *Towards socio-cyber-physical systems in production networks*, 2013.
- 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), *IEEE 51st Annual Conference*, 2012.
- 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. *14<sup>th</sup> International Conference on Automation & Computing*, Brunel University, West London, UK, 6 September 2008.
- JAMSHIDI MM, editor Sustainable energy systems: Cyber-physical based intelligent management of micro-grids. Logistics and Industrial Informatics (LINDI), *4<sup>th</sup> IEEE International Symposium*; Sept. 2012.
- KIM K.D, KUMAR P.R. 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, RAJAEI A, JAMSHIDI M, KELLEY BT, editors. Fuzzy control of electricity storage unit for Energy Management of Micro-Grids; 2012.



- MAZO. M, TABUADA. P. Decentralized event-triggered control over wireless sensor/actuator networks,” *Automatic Control, IEEE Transactions*, 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.*
- NEOGI. N. Safety and reliability in automotive cyber-physical systems, *Proc. National Workshop on High Confidence Automotive Cyber-Physical Systems, 2008.*
- ONAT. A, TEOMAN. A PARLAKAY. N.E. Model Based Predictive Networked Control Systems. *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, NEŠIĆ. D, ANTA. Event-triggered and self-triggered stabilization of distributed networked control systems. *Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC), 2011*
- SAHRAEI MANJILI Y, RAJAEI A, JAMSHIDI M, KELLEY BT, editors. Intelligent decision making for energy management in microgrids with air pollution reduction policy; 2012.
- SAMAD T, PARISINI T. Systems of Systems. *The Impact of Control Technology.*; 2011
- 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, *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.
- 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. Advanced control technologies in cyber-physical system; 2013

