

# REDES DE SENSORES Y SISTEMAS CIBERFÍSICOS

AL SERVICIO DE SISTEMAS  
DE TRANSPORTE  
INTELIGENTE





## SANDRA CÉSPEDES

Profesora Asistente Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Chile. Ph.D. Electrical and Computer Engineering, University of Waterloo, Canadá. Ingeniera Telemática Universidad Icesi, Colombia. Áreas de interés en investigación: redes de comunicaciones vehiculares, sistemas de transporte inteligente, protocolos de red para manejo de movilidad, comunicaciones en Smart Grid, integración de IPv6 y enrutamiento en la Internet de las Cosas. [scspedes@ing.uchile.cl](mailto:scspedes@ing.uchile.cl)

Con la introducción de las redes de comunicaciones e Internet en la década de los setenta, nuestras vidas han ido experimentando grandes cambios debido a la incorporación de tecnologías de comunicación en ámbitos cada vez más impensables. Desde la ubicuidad de conectividad mediante múltiples dispositivos que nos acompañan todo el tiempo (celulares, tabletas, laptops, relojes inteligentes, etc.), pasando por autos que se comunican entre sí para evitar accidentes, sensores desplegados en nuestros campos para la recolección y transmisión de información crucial para procesos de agricultura, hasta nanosensores instalados directamente en nuestra piel para monitorear signos vitales.

Muchos de estos sistemas “inteligentes” se iniciaron con el despliegue de sensores especializados que recolectaban información del mundo físico de manera aislada, pero rápidamente evolucionaron hacia lo que se conoce como *redes de sensores*, donde un nodo-sensor además de captar información tiene capacidades de recepción/transmisión desde y hacia otras entidades. Así, la información recolectada se puede procesar de manera eficiente, pero sobre todo oportunamente, e incluso en tiempo real.

Hoy en día, la mayoría de estas redes de sensores se han encapsulado bajo un término más complejo denominado como *sistemas ciberfísicos*,

los cuales ya no solo involucran recolección y transmisión de información, sino también elementos de computación para el procesamiento de datos, elementos de control para ejecución de acciones automatizadas sobre el mismo sistema (o incluso sobre sistemas externos), elementos de diseño de interfaces humano-máquina para la interacción del sistema con humanos (cuando se requiere), y por supuesto elementos confiables de comunicación para la interacción exitosa de todos los agentes interconectados.

Para sumar más términos a la ecuación, cuando los agentes involucrados –en particular aquellos que hacen parte del “mundo físico”– están conectados a Internet, se catalogan bajo lo que conocemos como la *Internet de las cosas*. Es así como las redes de sensores han pasado a ser un elemento crítico, pero no el único, en una red de agentes que tiene como fin expandir las capacidades del mundo físico tal y como hoy lo conocemos, para entender y automatizar procesos, pero sobre todo para tomar decisiones informadas y de amplio alcance.

En este artículo hablaremos en particular del uso de redes de sensores en ambientes móviles y que a su vez conforman un sistema ciberfísico. Un ambiente móvil por excelencia es aquel formado por la red de transporte urbano. Allí, la

conexión al mundo físico está presente en la forma de sensores a bordo de vehículos, cámaras de vídeo, aplicaciones de radar, entre otros. Para habilitar el intercambio de información inicialmente se propuso que los autos estuvieran habilitados con comunicaciones vehículo a vehículo (V2V, por su sigla en inglés) y vehículo a infraestructura (V2I, por su sigla en inglés), es decir conexión entre autos o desde el auto hacia estaciones base o puntos de acceso instalados en postes, señales de tránsito, semáforos, entre otros. De esta manera se contará con la plataforma para desplegar aplicaciones como prevención de accidentes, alarmas ante incidentes, control de navegación para gestión de tráfico, y coordinación de pelotones en las autopistas, haciendo que los sistemas de transporte inteligente puedan ser una realidad.

Sin embargo, la información que proviene de la red vehicular puede ser de interés no solo para los vehículos que están cerca sino también para nodos remotos conectados a través de Internet. Por ejemplo, un auto es monitoreado de forma remota en tiempo real por parte del fabricante, de manera que se pueda verificar su desempeño e incluso se prevengan posibles daños mediante la identificación temprana de problemas. Es así como los sistemas de transporte son también un área de aplicación de la Internet de las Cosas.

Una vez habilitada la comunicación en la red de transporte, una gran cantidad de información proveniente de los sensores estará disponible para alimentar sistemas remotos para aplicaciones de control de congestión, manejo de flotas y rastreo de vehículos, distribución de contenidos para sistemas de entretenimiento a bordo, monitoreo de variables medio ambientales y urbanas, entre otras. De hecho, muchas de estas funcionalidades ya están siendo provistas hoy en día por algunos fabricantes en autos de gama alta, con un producto denominado en inglés como "connected cars", en el cual se habilita en un plan celular de datos integrado al computador del vehículo o a través del teléfono móvil del usuario.

En el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Chile venimos desarrollando proyectos que involucran sistemas ciberfísicos en el área de transporte urbano. Nuestra investigación está orientada bajo el entendido de que la interacción entre todos los actores de un sistema de transporte, es decir vehículos, peatones, bicicletas y transporte público, forman una gran red urbana de sensores que puede ser aprovechada con diferentes objetivos (por ejemplo control de congestión, prevención de accidentes, etc.) [1][2]. El intercambio de información involucra no solo la conexión directa entre sen-

sos e Internet, sino también el intercambio de información en la red *peer-to-peer* formada por todos los actores del sistema de transporte urbano. A continuación se describen algunos de los proyectos actualmente en desarrollo.

## SISTEMA DE COOPERACIÓN DE BICICLETAS INTELIGENTES

En muchas ciudades, incluyendo Santiago, el uso de las bicicletas en entornos urbanos se ha ido incrementando de manera estable en la última década. Por supuesto, los beneficios del uso de formas alternativas de transporte son notorios; entre los más destacados están la reducción de contaminación y congestión vehicular. Sin embargo, en algunas ciudades (en particular ciudades europeas que llevan muchos años promoviendo el uso de la bicicleta), el incremento de ciclistas en las vías ha llegado al punto de desbordar la infraestructura existente, acarreado con ello un incremento en los riesgos de accidentes y cuellos de botellas que aparecen debido a gran-

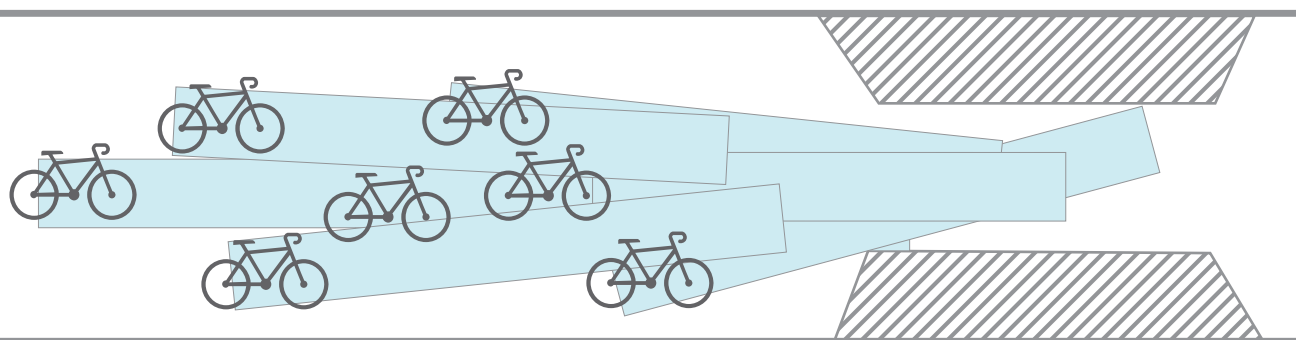


FIGURA 1. A  
CUELLOS DE BOTELLA Y RIESGO DE ACCIDENTES EN CICLOVÍAS CONGESTIONADAS.

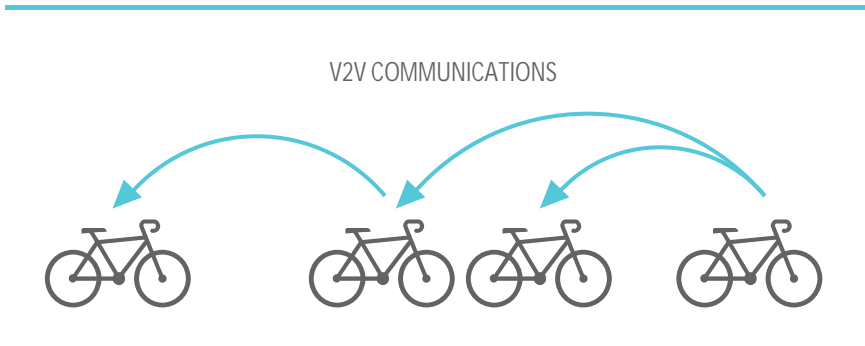


FIGURA 1. B  
COORDINACIÓN PROPUESTA MEDIANTE COMUNICACIONES V2V.

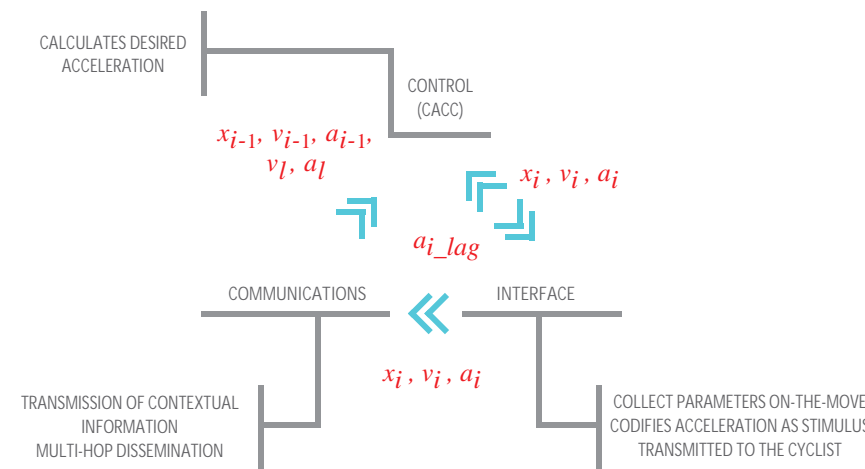


FIGURA 2.  
COMPONENTES DEL SISTEMA PARA COORDINACIÓN DE CICLISTAS CONECTADOS EN RED.

des aglomeraciones de ciclistas (Figura 1.a). Nuestro proyecto, desarrollado en colaboración con la Universidad Icesi (Colombia) enfrenta estos problemas mediante la incorporación de la conducción colaborativa –algo actualmente pensado para flotas de camiones de transporte— en el ciclismo urbano (Figura 1.b).

Se propone entonces habilitar la coordinación de los ciclistas a través de un sistema denominado “Platoon-based cyclists cooperative system” (Figura 2) [3]. Dicho sistema se soporta en un módulo de control que implementa la lógica de coordinación del grupo de ciclistas [4], un módulo de comunicaciones V2V, y un módulo Interfaz a través del cual se recoge información de movimiento y ubicación del ciclista y además se interactúa con el ciclista como ejecutor de las instrucciones calculadas por el módulo de control. Para que la comunicación sea confiable y oportuna, las bicicletas se comunican entre sí mediante tecnología inalámbrica IEEE 802.15.4 (la misma tecnología base de ZigBee), y como parte del proyecto se desarrolló un mecanismo de disseminación multisalto, que permite que un grupo de hasta 10 bicicletas se puedan mover de forma coordinada, manteniendo la mejor velocidad posible (impuesta por el líder del grupo), pero al mismo tiempo guardando una distancia segura entre cada par de bicicletas. En la Figura 3 se puede observar el resultado de simulaciones del sistema usando grupos desde 4 hasta 10 bicicletas, donde el objetivo es lograr mantener una distancia segura de 2 m. El prototipo, actualmente en desarrollo en Colombia, cuenta además con un novedoso mecanismo para indicar al ciclista cuál es la aceleración objetivo que debe alcanzar de manera de mantener su coordinación dentro del grupo.

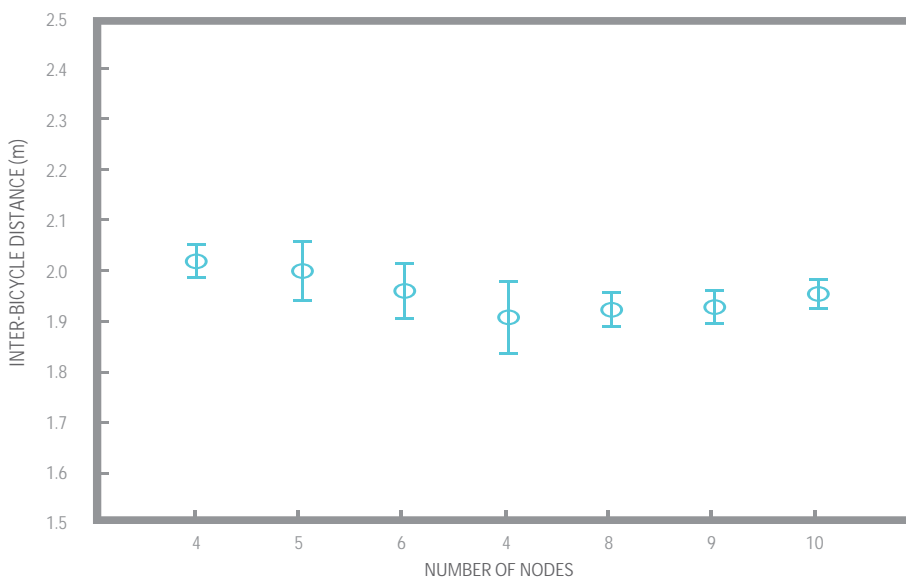


FIGURA 3.  
DISTANCIA OBTENIDA MEDIANTE SIMULACIONES PARA UN GRUPO DE 10 BICICLETAS CON DISTANCIA OBJETIVO DE 2 M.

## APROVECHAMIENTO DE DIVERSIDAD DE ACCESO EN REDES VEHICULARES HETEROGÉNEAS

Este proyecto considera a todos los actores del transporte urbano interactuando entre sí: peatones, autos y bicicletas. El objetivo general es explotar la diversidad existente de redes de

acceso inalámbrico (celular, WiFi, DSRC y conectividad V2V) de manera que se diseñen mecanismos efectivos de disseminación de información al beneficio de aplicaciones de eficiencia de

tráfico. El modelo de red heterogéneo sobre el cual se trabaja es ilustrado en la Figura 4.

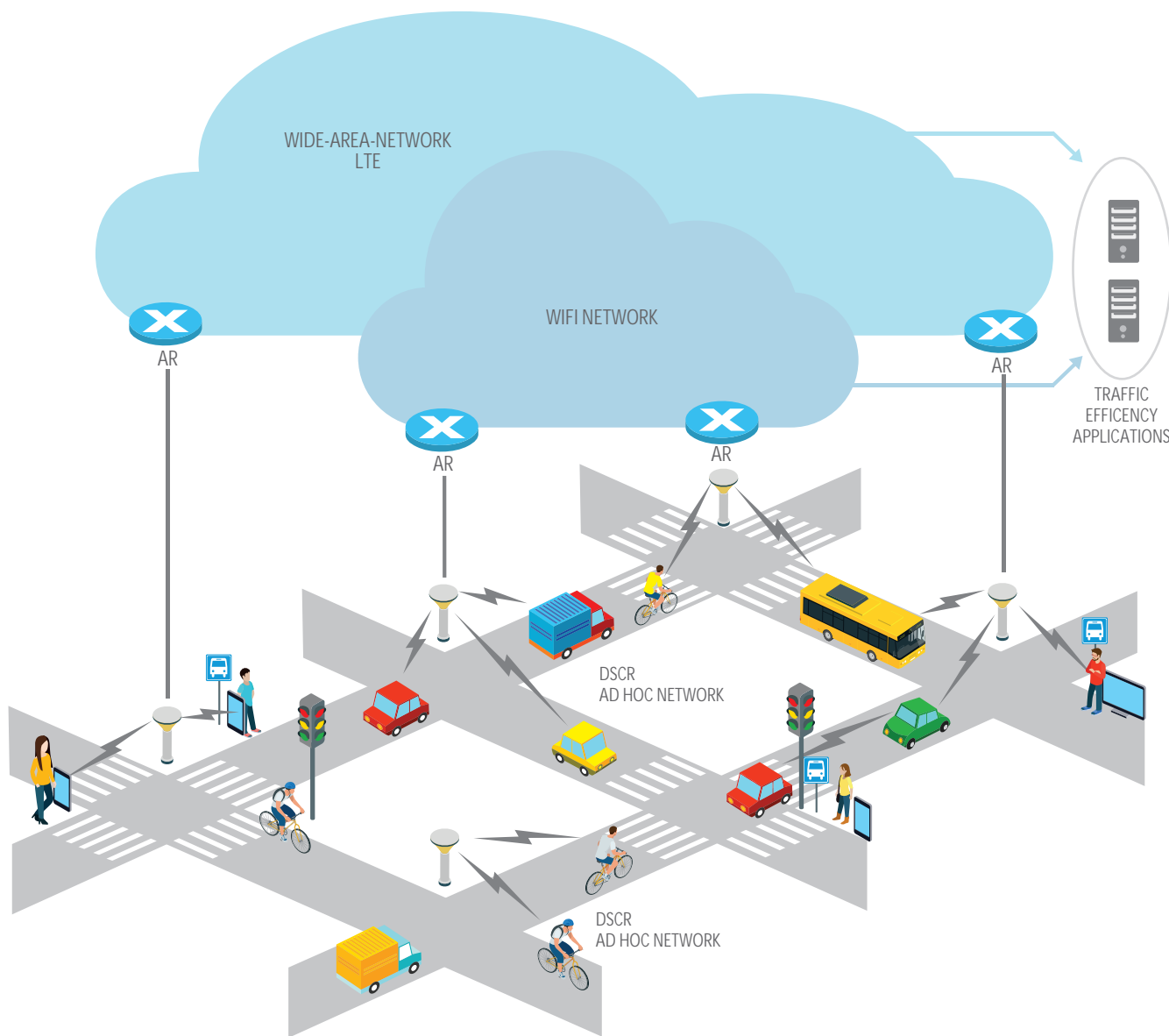


FIGURA 4.  
TRANSPORTE URBANO CON EXPLOTACIÓN DE REDES HETEROGÉNEAS DE ACCESO INALÁMBRICO.

Una aplicación actualmente en desarrollo, en colaboración con estudiantes del NIC Chile Research Labs, consiste en la predicción de giro abrupto del líder de un pelotón de autos (i.e., un grupo de vehículos ejerciendo conducción coordinada). A través de los sensores a bordo y comunicaciones V2V, miembros del grupo son capaces de estimar el giro abrupto y notificar a las bicicletas en riesgo acerca de la posibilidad de colisión. De esta manera se pretende reducir el riesgo de colisión en vías mixtas (i.e., un carril de autos contiguo al carril de bicicletas). También se ha propuesto un sistema de notificación postcolisión, el cual permite notificar a autos

dentro de un área de interés específica (i.e., en un área cercana al lugar del incidente) acerca de la colisión. La transmisión de la información se debe hacer con una latencia mínima, de manera que autos cercanos puedan reaccionar a tiempo y evitar mayores consecuencias [5]. Es por esto que se requieren protocolos de enrutamiento que garanticen la entrega de información crítica con altas restricciones en cuanto al retardo permitido.

Como se puede apreciar a partir de los trabajos descritos, la incorporación de redes de sensores e incluso de sistemas ciberfísicos permitirá que

sistemas tradicionales, como nuestro sistema de transporte urbano, puedan convertirse en fuentes de información valiosa para la toma de decisiones que en ciertos casos puede representar salvar vidas humanas. En este artículo hemos ilustrado algunos ejemplos de aplicaciones que combinan protocolos de comunicaciones para diseminación de información, redes inalámbricas móviles formadas por sensores en movimiento, procesamiento de información, mecanismos de control, y mecanismos de interacción humano-máquina que contribuyen al desarrollo de esta área de investigación multidisciplinaria. ■

## PROYECTOS QUE HAN CONTRIBUIDO AL FINANCIAMIENTO DE ESTA INVESTIGACIÓN

“EXPLOITING NETWORK DIVERSITY FOR IMPROVED PERFORMANCE OF TRAFFIC EFFICIENCY APPLICATIONS IN URBAN VEHICULAR NETWORKS”. PROYECTO FONDECYT INICIACIÓN 11140045, 2014-2017.

COMPLEX ENGINEERING SYSTEM INSTITUTE, ISCI (ICM - FIC: P05-004-F, CONICYT: FB0816).

“EFFICIENT DATA DISSEMINATION IN HETEROGENEOUS VEHICULAR COMMUNICATION NETWORKS”. PROGRAMA U-INICIA VID 2014-005, 2014-2016.

“DISEÑO Y EVALUACIÓN DE MEDIADORES DE COMPORTAMIENTO DE AGENTES CONECTADOS EN RED”. CONVOCATORIA INTERNA UNIVERSIDAD ICESI, 2013-2016.

## REFERENCIAS

[1] E. Magistretti, M. Gerla, P. Bellavista, and A. Corradi, “Dissemination and Harvesting of Urban Data Using Vehicular Sensing Platforms”, *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 58, no. 2, pp. 882–901, Feb. 2009.

[2] X. Yu, Y. Liu, Y. Zhu, W. Feng, L. Zhang, H. F. Rashvand, and V. O. K. Li, “Efficient sampling and compressive sensing for urban monitoring vehicular sensor networks”, *IET Wirel. Sens. Syst.*, vol. 2, no. 3, p. 214, 2012.

[3] S. Céspedes, J. Salamanca, A. Yáñez, C. Rivera, and J. C. Sacanamboy, “Platoon-based Cyclists Cooperative System” in *IEEE Vehicular Networking Conference*, Kyoto, 2015, pp. 112-118.

[4] R. Rajamani and H. Tan, “Demonstration of integrated longitudinal and lateral control for the operation of automated vehicles in platoons,” *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 8, no. 4, pp. 695–708, Jul. 2000.

[5] A. M. Orozco, S. Céspedes, R. Michoud, and G. Llano, “Design and simulation of a collision notification application with geocast routing for car-to-car communications”, *Eur. Transp. Res. Rev.*, vol. 7, no. 4, p. 36, Oct. 2015.