

Arquitectura de Red de Comunicaciones Inalámbricas para la Industria 4.0

M.C. Lucas-Estañ, M. Sepulcre, J. Gozalvez

m.lucas@umh.es, msepulcre@umh.es, j.gozalvez@umh.es

UWICORE Laboratory, Universidad Miguel Hernández de Elche (UMH), Elche, España

Abstract- Under the Industry 4.0 paradigm, factories of the future will be digitalized and networked factories where components will be able to communicate with each other, and intelligence will be spread among the different elements of the production systems. Different industrial applications will coexist in the same environment demanding very different and stringent communication requirements in terms of latency, reliability and data rate. These applications can vary from virtual reality applications that require high throughput levels to time-critical automation processes demanding low data rates and ultra-high latency. The communication network will be one of the key technological enablers of Industry 4.0. In this context, this paper proposes a hierarchical management architecture that allows the integration of different communication technologies. The proposed architecture considers the use of RAN Slicing and Cloud RAN as enabling technologies to achieve the flexibility, scalability and adaptation capabilities required to support the high-demanding and diverse industrial environment.

I. INTRODUCCIÓN

La industria está experimentando una nueva revolución hacia las Fábricas del Futuro (*Factories of the Future*) altamente eficientes, conectadas y flexibles, concepto también conocido con el nombre de Industria 4.0 [1]. La introducción de los sistemas CPS (*Cyber-Physical-Systems*) y el IoT (*Internet-of-Things*) en el entorno industrial permitirá la creación de fábricas inteligentes, digitalizadas y conectadas en las que sus distintos componentes y máquinas podrán comunicarse entre sí [2], y tendrán capacidades de auto-optimización, auto-configuración y auto-diagnóstico. Además, el concepto de fábricas gestionadas de manera centralizada en las que grandes cantidades de datos se envían a un centro de datos remoto está cambiando a una gestión dinámica y descentralizada, en la que la inteligencia se expande sobre el sistema de producción, controladores y plataformas centralizadas en la nube.

En este nuevo entorno industrial coexistirán un amplio conjunto de aplicaciones y servicios con requisitos de comunicaciones muy diferentes. El sector industrial es además uno de los sectores más exigentes con respecto al número de nodos conectados, demandas de ultra-bajas latencias y ultra-alta fiabilidad, en términos de eficiencia energética y con requisitos de muy bajo coste [3]. Este hecho supone un desafío importante en el diseño de las redes de comunicación. La red de comunicaciones debe construirse sobre una arquitectura flexible capaz de satisfacer de manera eficiente los requisitos de las aplicaciones industriales, y con especial atención, de las aplicaciones de automatización con estrictos requisitos de tiempo.

Tradicionalmente, las redes de comunicación en sistemas industriales han estado basadas en tecnologías cableadas como HART, PROFIBUS, *Foundation Fieldbus* H1, etc., o en

tecnologías basadas en Ethernet. Mientras las tecnologías cableadas proporcionan comunicaciones con muy alta fiabilidad, estas fallan en proporcionar flexibilidad y adaptabilidad, requisitos indispensables para la Industria 4.0. Por otro lado, las tecnologías inalámbricas pueden proporcionar conectividad a objetos móviles (robots, maquinaria o trabajadores), a la vez que ofrecen gran flexibilidad al suprimir el despliegue de cables. WirelessHART, ISA100.11a e IEEE802.15.4e son algunas de las tecnologías de comunicación inalámbricas desarrolladas para dar soporte a aplicaciones de control y automatización industrial. Estas tecnologías operan sobre bandas de frecuencia sin licencia y están basadas en un sistema de gestión centralizado. Aunque la gestión centralizada proporciona comunicaciones con altos niveles de fiabilidad, también conlleva un elevado intercambio de señalización y elevados tiempos de reconfiguración que limitan las capacidades de escalabilidad y reconfiguración de estas redes, tal y como se muestra en [4].

Para mejorar la flexibilidad y escalabilidad de las redes industriales inalámbricas, trabajos como [4] y [5] proponen arquitecturas jerárquicas en las que la red es dividida en múltiples subredes. Cada subred tiene su propio controlador local y una entidad global gestiona la red completa y coordina las decisiones de los gestores de cada subred. Los autores de [5] proponen además el uso de tecnologías heterogéneas en distintas subredes. Mientras la arquitectura propuesta en [5] está principalmente diseñada para garantizar los requisitos de comunicaciones inalámbricas con estrictos requisitos de tiempo, este trabajo se centra en el diseño de una arquitectura de gestión de las comunicaciones flexible, que sea capaz de satisfacer los variados y exigentes requisitos de comunicación de las aplicaciones y servicios que coexistirán en las fábricas del futuro.

La arquitectura propuesta en este trabajo es la arquitectura de gestión de comunicaciones definida en el proyecto H2020 AUTOWARE [6], el cual tiene como objetivo construir un ecosistema abierto que disminuya las barreras a las que se enfrentan las MIPYMES (micro, pequeñas y medianas empresas) para el desarrollo de aplicaciones de automatización cognitiva y la aplicación de procesos de fabricación autónoma. AUTOWARE propone el uso de una red de comunicaciones heterogénea que integre diferentes tecnologías de comunicaciones. El objetivo es explotar las distintas capacidades de distintas tecnologías de comunicaciones para satisfacer el amplio rango de requisitos impuesto por la Industria 4.0 de una manera fiable y eficiente. Con este objetivo, la arquitectura propone un enfoque jerárquico en el que una entidad central garantiza la coordinación de las decisiones tomadas por gestores locales y distribuidos. La

arquitectura propuesta está basado en el uso de RAN (*Radio Access Network*) *Slicing* y *Cloud RAN* como tecnologías habilitadoras que permitirán alcanzar los niveles de flexibilidad, escalabilidad y adaptación requerida.

II. REQUISITOS DE LA INDUSTRIA 4.0

El concepto de Industria 4.0 introduce un nuevo y complejo entorno de comunicación en el que una gran variedad de aplicaciones y servicios industriales coexistirán, todos ellos demandando requisitos de comunicación muy diferentes a la vez que exigentes. El 5GPPP clasifica los casos de uso industriales en cinco familias con diferentes requisitos en términos de latencia, fiabilidad, disponibilidad, tasas de transmisión, etc. Las familias identificadas por el 5GPPP incluyen desde lazos de control con estrictos requisitos de tiempo en los que nodos sensores transmiten a bajas tasas de transmisión con requisitos de ultra-baja latencia y ultra-alta fiabilidad, a procesos de control de calidad que presenta requisitos de latencia más relajados pero con necesidades elevadas de ancho de banda. La Tabla I muestra los requisitos de comunicación para tres aplicaciones industriales que ilustran el amplio rango de requisitos demandado por la Industria 4.0. La diversidad de requisitos de comunicación demandados por la Industria 4.0 también ha sido evidenciada en [7]: la transmisión de comandos de un PLC (*Programmable Logic Controller*) a un robot requiere una tasa de transmisión de datos menor a 100 kb/s con una latencia máxima de 1 ms, mientras que la transmisión de imágenes de tamaño entre 1-100 Mb desde una cámara a un sistema de visualización 3D tolera una latencia máxima de 5 ms.

TABLA I. REQUISITOS DE COMUNICACIÓN PARA ALGUNAS APLICACIONES INDUSTRIALES [8]

	<i>Control de movimiento</i>	<i>Monitorización</i>	<i>Realidad aumentada</i>
Latencia/Ciclo	250 μ s – 1ms	100ms	10ms
Fiabilidad (PER)	1e ⁻⁸	1e ⁻⁵	1e ⁻⁵
Tasa de transmisión	kbit/s – Mbit/s	kbit/s	Mbit/s – Gbit/s

III. ARQUITECTURA DE COMUNICACIONES

A. Tecnologías Heterogéneas de Comunicación

El amplio rango de requisitos de comunicación demandado por las aplicaciones industriales es difícil de satisfacer de manera eficiente con una única tecnología de comunicaciones. Por este motivo, este trabajo propone explotar las diferentes capacidades que presentan las distintas tecnologías de comunicaciones disponibles. Por ejemplo, tecnologías inalámbricas sin licencia como por ejemplo WirelessHART, ISA100.11a o IEEE802.15.4e son adecuadas para satisfacer de manera eficiente los requisitos de aplicaciones de monitorización y producción que no presentan estrictos requisitos en términos de latencia. Sin embargo, estas tecnologías no son capaces de satisfacer demandas de mayores anchos de banda que surgen por la digitalización de la industria, ni de integrar nodos móviles como robots que se desplazan por la fábrica. Por otro lado, los estándares celulares que operan en bandas licenciadas introdujeron en el *Release 14* (3GPP TS 36.881) mecanismos para reducir la latencia de la comunicación con el objetivo de soportar aplicaciones con estrictos requisitos de retardo. Además, las Fábricas del Futuro constituyen uno de los sectores principales para el 5G-PPP. La

tecnología 5G están siendo desarrollada para dar soporte a una gran variedad de aplicaciones, siendo un objetivo importante las comunicaciones ultra fiables y con baja latencia o URLLC (*Ultra Reliable Low Latency Communications*) con requisitos de latencia de 1 ms y fiabilidad de 1-10⁻⁹ [9].

En este contexto, este trabajo propone desplegar varias subredes o celdas (en el resto del artículo se utilizará el término celda) implementando tecnologías heterogéneas para cubrir una planta industrial. Cada nodo de la red se conectará a la celda que sea capaz de satisfacer de manera más eficiente sus necesidades de comunicación. Por ejemplo, WirelessHART puede ser utilizado para monitorizar el nivel de líquido y controlar una válvula, mientras que comunicaciones 5G pueden emplearse para la comunicación entre un sensor y un actuador con estrictos requisitos de tiempo. La Fig. 1 ilustra el concepto de celdas en la arquitectura propuesta.

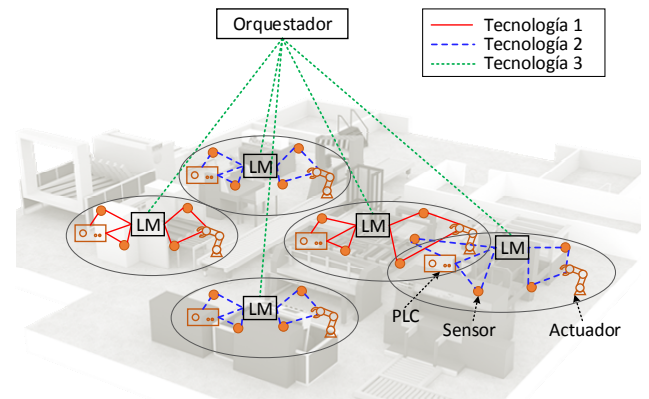


Fig. 1. Arquitectura de comunicaciones y gestión de datos jerárquica y heterogénea.

B. Arquitectura de Gestión Jerárquica

La arquitectura propuesta considera una estructura de gestión de comunicaciones jerárquica que combina decisiones locales y descentralizadas con decisiones centralizadas con el objetivo de lograr una gestión eficiente de la red. La Fig. 1 muestra la estructura de gestión propuesta. El Orquestador y los gestores locales o LMs (*Local Managers*) se presentan a continuación.

Cada celda incorpora un LM. Cada LM está a cargo de la gestión local de los recursos radio dentro de su celda, y toma decisiones locales para asegurar que se satisfacen los requisitos de comunicación de cada nodo en su celda. Como muestra la Fig. 2, los LMs son los encargados de ejecutar funciones como Asignación de Recursos Radio, Control de Potencia o *Scheduling*. Estas funciones coordinan de manera local el uso de los recursos radio entre dispositivos asignados a la misma celda, y requieren tiempos de respuesta muy cortos. El Control de Interferencia dentro de la Celda debe realizarse también por el LM si varias transmisiones dentro de una misma celda pueden compartir los recursos radio. Los LMs también envían información al Orquestador sobre el rendimiento experimentado dentro de la celda.

Gracias a su visión global, el Orquestador tiene la capacidad y la información necesaria para adaptar la configuración de la red de manera global, y por tanto está a cargo de gestionar y coordinar el uso de los recursos radio en las diferentes celdas. El Orquestador establece restricciones en el uso de los recursos radio que cada celda debe cumplir con el objetivo de garantizar la coordinación entre diferentes celdas. Por ejemplo, ante cambios en la configuración de la planta industrial o en el sistema de producción, el Orquestador

puede reasignar bandas de frecuencia a las celdas que utilizan espectro con licencia en base a las nuevas condiciones de carga o los nuevos requisitos de comunicación. El Orquestador debe evitar interferencias entre celdas que implementan la misma tecnología (tecnología que puede utilizar espectro con licencia). Además, debe garantizar la integración e interacción entre celdas que implementan diferentes tecnologías inalámbricas que utilizan espectro sin licencia, evitando interferencias entre sistemas, por ejemplo, realizando la asignación dinámica de canales no interferentes a diferentes celdas en base a la demanda actual. También puede establecer restricciones sobre la potencia de transmisión máxima a utilizar o los recursos radio a asignar a determinadas transmisiones para garantizar la coordinación entre celdas. Además, es el responsable del Control de Admisión, decidiendo a qué celda se debe conectar cada nuevo nodo en base a sus capacidades de comunicación y las condiciones de operación actuales. Los dispositivos también pueden participar en funciones de gestión, por ejemplo, en el caso de que se implementen técnicas de gestión distribuidas para comunicaciones D2D en celdas 5G (ver la Fig. 2).

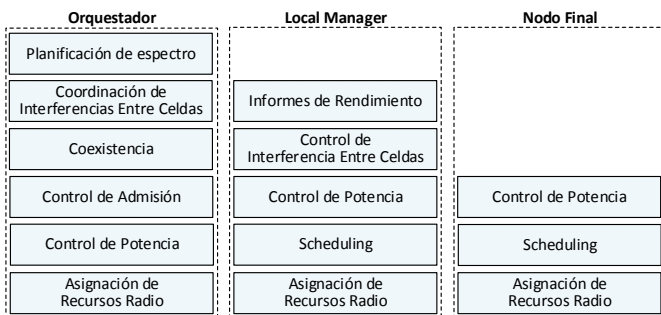


Fig. 2. Funciones de gestión de la comunicación de las diferentes entidades que componen la arquitectura de gestión jerárquica.

C. Organización Multi-Capa

En la arquitectura propuesta, las celdas se organizan en capas diferentes en función de los requisitos de comunicación de la aplicación industrial a la que dan soporte. Los LMs de celdas incluidas en diferentes capas consideran el uso de algoritmos de gestión de recursos radio diferentes para cumplir de manera eficiente con los estrictos requisitos de las diferentes aplicaciones industriales. Si utilizamos como ejemplo el mecanismo de *scheduling*, las celdas que implementan LTE pueden aplicar un mecanismo de *scheduling* semi-persistente para garantizar comunicaciones con ultra baja latencia; este mecanismo de *scheduling* asigna recursos a los usuarios de manera semi-persistente evitando el retardo que conlleva el intercambio de mensajes de señalización para solicitar y garantizar el acceso a los recursos. Sin embargo, el *scheduling* semi-persistente no resulta adecuado para servicios con requisitos de latencia menos exigentes debido a la posibilidad de realizar un uso poco eficiente de los recursos radio.

Los requisitos de las aplicaciones industriales que soportan las distintas celdas también influyen en el tipo de interacción entre el LM de la celda y el Orquestador. Si la aplicación no presenta requisitos de bajas latencias, el LM correspondiente puede delegar algunas de las funciones de gestión al Orquestador. Esto permite llevar a cabo una mejor coordinación entre este tipo de celdas. Cuando las aplicaciones presentan requisitos de latencia muy estrictos es preferible que las decisiones de gestión sean tomadas de forma local por los LMs (see Fig. 3).

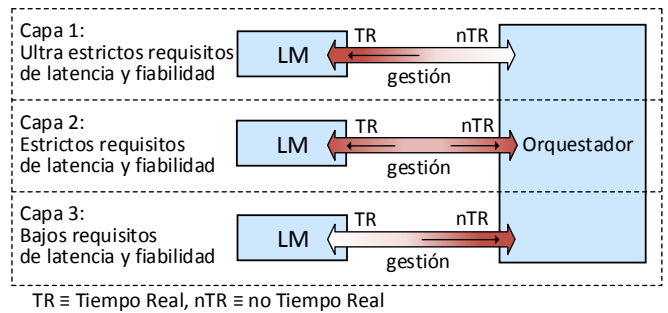


Fig. 3. Interacción LM-Orquestador en diferentes capas de la arquitectura de gestión.

IV. VIRTUALIZACIÓN Y SOFTWAREIZACIÓN

Eficiencia, agilidad y flexibilidad son características fundamentales que las futuras arquitecturas de redes de comunicación deben cumplir para soportar los estrictos y diversos requisitos que demandarán los futuros sistemas de comunicación (entre los cuales se incluye los sistemas industriales) [10]. En este contexto, la arquitectura de comunicaciones y gestión de datos propuesta en este artículo considera el uso de *RAN Slicing* y *Cloud RAN* como tecnologías habilitadores para alcanzar la flexibilidad y eficiencia buscada.

A. RAN Slicing

Algunas tecnologías de comunicaciones inalámbricas pueden dar soporte a distintas aplicaciones industriales con distintos requisitos de comunicación. Por ejemplo, LTE o redes 5G podrían soportar comunicaciones que requieren ultra baja latencia y alta fiabilidad correspondientes a procesos de automatización. La misma tecnología podría dar soporte también a aplicaciones que requieren altos valores de *throughput*, como por ejemplo, aplicaciones de realidad virtual o vídeo de ultra alta definición 4K/8K. En este contexto, la arquitectura propuesta considera que cada celda puede soportar varias aplicaciones industriales que pueden requerir diferentes funciones o técnicas de gestión para garantizar sus requisitos en términos de tasas de transmisión, retardo o fiabilidad. En este caso, además resulta muy importante asegurar la independencia en el rendimiento experimentado entre las distintas aplicaciones. Para alcanzar estos objetivos, se considera que la arquitectura propuesta se construye sobre una red virtualizada que permite la implementación de *RAN Slicing*. *RAN Slicing* está basado en las tecnologías SDN (*Software Defined Networking*) y NFV (*Network Function Virtualization*) y propone dividir los recursos físicos y las funciones de gestión de una única RAN en diferentes rebanadas o *slices* para crear múltiples redes lógicas (virtuales) [11]. Cada una de estas *slices*, en este caso, RANs virtuales, debe tener asignados los recursos necesarios para satisfacer los requisitos de comunicación de la aplicación o servicio al cual da soporte. Es importante resaltar que uno de los principales objetivos de *RAN Slicing* es garantizar la independencia en términos de rendimiento entre aplicaciones o servicios soportados por distintas *slices* de una misma red física [11]. Como resultado, *RAN Slicing* resulta una tecnología clave para desplegar arquitecturas de comunicación flexibles capaces de satisfacer los variados y exigentes requisitos de comunicación de las aplicaciones industriales, y en particular, de las comunicaciones URLLC.

En este trabajo nos referiremos a cada *slice* de una celda física como celda virtual (Fig. 4). Cada celda virtual debe tener

asignados la cantidad de recursos RAN necesarios para satisfacer los requisitos de los enlaces de comunicación a los que da servicio. La cantidad de recursos RAN (por ejemplo, recursos radio, de computación, o de almacenamiento de datos, etc.) asignados a cada celda virtual se debe adaptar de manera dinámica en base a las condiciones variantes de operación como la cantidad de tráfico o la calidad de los enlaces. El Orquestador es la entidad de gestión encargada de crear y gestionar los distintos *slices* o celdas virtuales, ya que gracias a la información recibida desde los LMs, el Orquestador tiene una visión global del rendimiento experimentado en cada celda (o celda virtual).

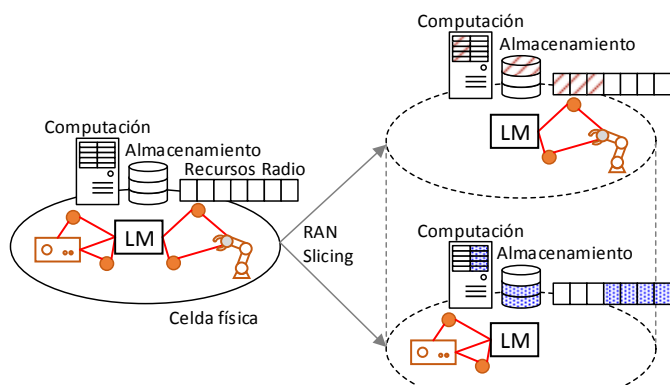


Fig. 4. Celdas virtuales basadas en *RAN Slicing*.

B. Cloud RAN

Cloud RAN es un novedoso paradigma basado en NFV [12]. *Cloud RAN* divide las estaciones base en dos unidades diferentes: la unidad radio denominada *Radio Remote Head* (RRH), y la unidad de procesamiento de la señal denominada como *Base Band Unit* (BBU). *Cloud RAN* propone mover las BBUs a la nube o *cloud*. De esta manera, *Cloud RAN* cambia el concepto de arquitectura distribuida tradicional a un nuevo concepto centralizado, en el que algunas o todas las funciones de gestión y procesamiento de las estaciones base son implementadas en un entorno centralizado de BBUs virtuales (un conjunto de procesadores que realizan funciones de procesamiento de señal y que es compartido por todas las celdas, ver Fig. 5) [12].

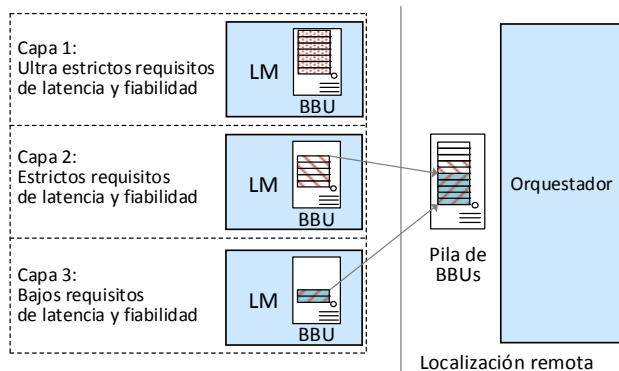


Fig. 5. Concepto de *Cloud RAN*: las unidades de procesamiento de la señal (BBUs) se implementan en la nube o *cloud*.

En este contexto, *Cloud RAN* se convierte en una tecnología base para la implementación de la arquitectura propuesta. En la arquitectura propuesta, *Cloud RAN* será clave para alcanzar una coordinación precisa entre celdas y controlar interferencias entre celdas y entre distintas tecnologías; centralizar funciones de procesamiento y gestión en la misma localización permite

mejorar la coordinación e interacción entre distintas celdas. *Cloud RAN* puede soportar diferentes divisiones funcionales que están perfectamente alineadas con las necesidades de las aplicaciones en Industria 4.0 [12]; algunas funciones de procesamiento pueden ser ejecutadas de manera remota mientras otras con fuertes requisitos de tiempo real pueden ejecutarse localmente en la celda.

V. CONCLUSIONES

Este trabajo propone y define una arquitectura de gestión de las comunicaciones heterogénea, jerárquica y multi-capa para proporcionar conectividad ubicua, flexible y fiable a las fábricas del futuro bajo el paradigma de la Industria 4.0. La arquitectura propuesta explota las distintas capacidades de tecnologías de comunicación heterogéneas para satisfacer el amplio rango de requisitos de comunicación demandados por distintas aplicaciones industriales. Para garantizar la integración de distintas tecnologías en una única red de manera que se garanticen comunicaciones fiables y eficientes, la arquitectura propuesta permite la implementación de una gestión híbrida con decisiones locales y descentralizadas (que proporcionan flexibilidad y adaptabilidad a requisitos particulares) coordinadas por un orquestador central que toma decisiones para garantizar el rendimiento óptimo de la red. La arquitectura propuesta considera el uso de *RAN Slicing* y *Cloud RAN* como habilitadores que permitirán alcanzar los requisitos de flexibilidad, adaptabilidad, fiabilidad y eficiencia de las aplicaciones y servicios en la Industria 4.0.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la Comisión Europea a través del proyecto H2020 FoF-RIA AUTOWARE: Wireless Autonomous, Reliable and Resilient Production Operation Architecture for Cognitive Manufacturing (No. 723909).

REFERENCIAS

- [1] European Factories of the Future Association (EFFRA) "Factories 4.0 and Beyond", Septiembre 2016.
- [2] M. Wollschlaeger et al., "The Future of Industrial Communication: Automation Networks in the Era of the Internet of Things and Industry 4.0", *IEEE Industrial Electronics Mag.*, vol. 11, pp. 17-27, Marzo 2017.
- [3] 5GPPP, *5G and the Factories of the Future*, Oct. 2015.
- [4] C. Lu et al., "Real-Time Wireless Sensor-Actuator Networks for Industrial Cyber-Physical Systems", *Proc. of the IEEE*, vol. 104, no. 5, pp. 1013-1024, Mayo 2016.
- [5] I. Aktas, et al. "A Coordination Architecture for Wireless Industrial Automation", in *Proc. European Wireless Conference*, Dresden, Germany, Mayo 2017.
- [6] Proyecto H2020 AUTOWARE website: <http://www.autoware-eu.org/>.
- [7] E. Molina, et al., "The AUTOWARE Framework and Requirements for the Cognitive Digital Automation", in *Proc. 18th IFIP Working Conf. on Virtual Enterprises (PRO-VE)*, Vicenza, Italy, Sept. 2017.
- [8] Plattform Industrie 4.0, "Network-based communication for Industrie 4.0", *Publications of Plattform Industrie 4.0*, April 2016. Disponible en <http://www.plattform-i40.de>. Último acceso el 15/04/2018.
- [9] ITU-R M.2083-0, IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond, Sept. 2015.
- [10] Gary Maidment, "One slice at a time: SDN/NFV to 5G network slicing", *Communicate (Huawei Technologies)*, Issue 81, pp. 63-66, Dic. 2016.
- [11] J. Ordóñez-Lucena, et al., "Network Slicing for 5G with SDN/NFV: Concepts, Architectures, and Challenges", *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, Issue 5, pp. 80-87, Mayo 2017.
- [12] A. Checko et al., "Cloud RAN for Mobile Networks—A Technology Overview", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 1, pp. 405-426, 2015.