

Conectividad en Redes WSN Móviles en Entornos Industriales

Miguel Sepulcre⁽¹⁾, José Antonio Palazón⁽¹⁾, Javier Gozalvez⁽¹⁾, Jaime Orozco⁽²⁾, Gonzalo Prieto⁽²⁾

msepulcre@umh.es, jpalazon@umh.es, j.gozalvez@umh.es, jorozcog@indra.es, gprieto@indra.es

⁽¹⁾ Uwicore, Ubiquitous Wireless Communications Research Laboratory, www.uwicore.umh.es

Universidad Miguel Hernández de Elche. Avda. de la Universidad s/n, 03202, Elche, España

⁽²⁾ INDRA Sistemas, S.A. C/Anabel Segura 7, 28108 Alcobendas, Madrid, España

Abstract- The future deployment of distributed and mobile sensing technologies in industrial environments provides interesting opportunities to further improve the workers' health and safety in the Factories of the Future. Such technologies will allow detecting in advance dangerous situations and conditions, and taking the necessary preventive actions. Wireless technologies would represent an essential component of the Factories of the Future in order to facilitate the real-time and ubiquitous connectivity of mobile sensors. In this context, this paper presents initial results of a measurement campaign that analyses the connectivity capabilities of the IEEE 802.15.4/ZigBee technologies for mobile sensing applications, and their use in collision avoidance applications.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, diferentes iniciativas de investigación internacional se encuentran trabajando en la definición y el diseño del concepto de Fábricas del Futuro (FoF, *Factory of the Future*). A nivel Europeo, la iniciativa FoF se centra en aumentar la base tecnológica de la industria Europea, haciendo especial hincapié en el desarrollo y la integración de tecnologías, tales como las tecnologías de ingeniería, TIC y materiales avanzados para máquinas adaptables y procesos industriales. En este nuevo marco de FoF, los trabajadores y sus conocimientos representarán un activo más importante para la competitividad y productividad en la fabricación, y deberán tomarse todas las medidas necesarias para mejorar su salud y seguridad en su entorno de trabajo. Con este objetivo, el proyecto FASyS (Fábrica Absolutamente Segura y Saludable) [1], que agrupa a 13 empresas y 14 instituciones de investigación bajo la iniciativa española CENIT, tiene como objetivo el desarrollo de un nuevo modelo de fábrica que reduzca al mínimo los riesgos para la salud y la seguridad de los trabajadores y garantice su bienestar en las fábricas de manipulación, montaje y mecanizado del futuro.

Para lograr sus objetivos, el proyecto FASyS aborda diversos aspectos como el desarrollo de protocolos de prevención y soluciones personalizadas de monitorización de la salud, técnicas de procesamiento de datos clínicos, inteligencia para la toma de decisiones y análisis, etc. Un componente tecnológico clave de FASyS es el desarrollo de un sistema heterogéneo de comunicaciones inalámbricas diseñado para permitir la monitorización continua del entorno de trabajo, y la salud de los trabajadores y sus condiciones fisiológicas. Dicho sistema se está diseñando para que sea capaz de detectar en tiempo real condiciones potencialmente peligrosas y activar las medidas necesarias para evitar su impacto en la salud y seguridad de los trabajadores. Una de las

tecnologías que formarán parte de la solución heterogénea de FASyS debido a su flexibilidad, bajo coste y bajo consumo de energía son las redes de sensores inalámbricas (WSN, *Wireless Sensor Networks*).

Las redes de sensores inalámbricas ofrecen la posibilidad de soportar aplicaciones distribuidas de sensado en una gran variedad de entornos. Sin embargo, su uso en entornos industriales, habitualmente caracterizados por la presencia de maquinaria en funcionamiento y materiales metálicos altamente reflexivos, requiere un análisis cuidadoso de las condiciones de propagación y conectividad antes del dimensionado y despliegue de la red. Diferentes estudios han analizado y caracterizado las condiciones de propagación radio en el entorno industrial. Por ejemplo, [2] estudia las condiciones de propagación de banda estrecha en cinco fábricas en la banda de frecuencia de 1282MHz; las medidas se llevaron a cabo teniendo en cuenta una altura de antena de 2m tanto para el transmisor como para el receptor. Basándose en los resultados obtenidos, los autores clasifican las características físicas del canal radio en 4 categorías dependiendo de la topografía de la fábrica, teniendo en cuenta aspectos como las condiciones de visibilidad (LOS, *Line of Sight*) y la presencia de obstáculos cercanos. [3] extiende la caracterización del canal radio en entornos industriales a otras bandas de frecuencia (900MHz, 2400MHz y 5200MHz). El estudio se basó en un despliegue de antena emulando la colocación de puntos de acceso inalámbricos industriales y terminales, con alturas de antena de 6m y 2m respectivamente. Este modelo fue validado más tarde en [4] con medidas del nivel de señal recibida obtenidas mediante una aplicación software de monitorización WLAN. Estudios como [5] y [6] analizan en detalle los efectos físicos de reflexión, difracción y absorción producidos por ciertos obstáculos a diferentes distancias de un nodo inalámbrico. Estos estudios ponen de manifiesto la gran influencia de la posición de los nodos transmisor y receptor con respecto a superficies metálicas debido a la gran reflexión de la señal. En [7], el autor evalúa el rendimiento de una WSN basada en IEEE 802.15.4/ZigBee con un despliegue de 20 - 30 nodos estáticos. Los resultados obtenidos muestran niveles de fiabilidad por encima del 99,5% gracias a una correcta colocación de los nodos. También se presenta en [8] un estudio relacionado que incluye estimaciones de la tasa de paquetes erróneos recibidos (PER, *Packet Error Rate*) y su latencia ante un despliegue de dispositivos IEEE 802.11. En este contexto, es de destacar que los estudios presentados hasta la fecha se han

realizado generalmente con nodos estáticos y con alturas de antena relativamente elevadas. El potencial y la demanda de aplicaciones de sensado en movilidad en entornos industriales, requiere realizar nuevos estudios considerando la movilidad de los nodos y reducidas alturas de antena emulando sensores de monitorización de las condiciones de los trabajadores. En este contexto, este documento presenta los primeros resultados de una campaña de medidas realizada para evaluar la conectividad inalámbrica de dispositivos de sensado en movilidad con tecnología IEEE 802.15.4/ZigBee en entornos industriales.

II. ENTORNO INDUSTRIAL DEL TEST

La campaña de medidas ha sido realizada en el pabellón principal de las instalaciones de GORATU, un importante fabricante español de máquina herramienta. Con una superficie de más de 10.000m², la planta se caracteriza por un muro perimetral de hormigón y una altura del edificio de 11m (Fig. 1). El interior de la planta está compuesto principalmente por amplios pasillos y zonas normalmente separadas por muros de hormigón de unos 2m de altura que no llegan a alcanzar el techo. La planta entera cuenta con varias grúas de gran tamaño capaces de levantar y transportar materiales de gran peso (Fig. 2). La Fig. 1 también muestra la existencia de un almacén, que normalmente se emplea para el almacenamiento de diversos tipos de piezas metálicas en estanterías de gran tamaño. Como se ilustra en la Fig. 2, la planta se caracteriza por la presencia de un gran número de obstáculos metálicos que podrían afectar a la conectividad inalámbrica.

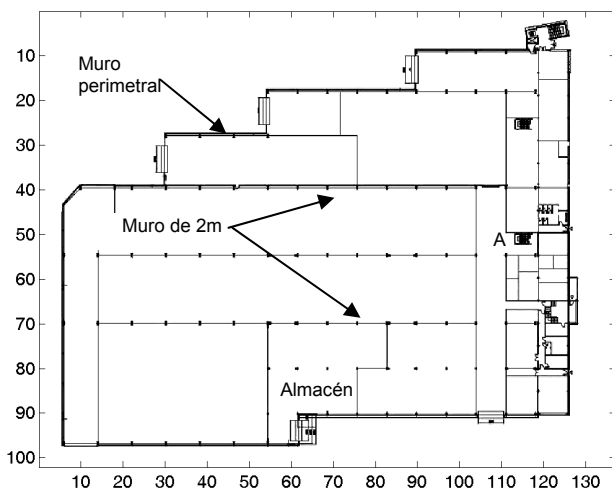


Fig. 1. Plano en planta del pabellón principal de GORATU (ejes en metros). A indica el punto donde se tomó la imagen de la Fig. 2.

Los resultados de la campaña de medidas que se presentan en este documento se obtuvieron utilizando dos motes IRIS MEMSIC (transmisor y receptor) que trabajan en la banda de frecuencia de 2400MHz. Los motes pueden transmitir a una velocidad máxima de 250kbps y con una potencia RF de 3dBm. Además, se caracterizan por una sensibilidad de recepción de -101dBm. Los motes IRIS implementan las capas PHY y MAC definidas en el estándar IEEE 802.15.4, así como capas superiores compatibles con ZigBee. Los motes incluyen una placa de procesamiento (XM2110) basada en el Microcontrolador Atmel ATmega1281 de bajo consumo.

En los experimentos realizados, el nodo transmisor es un nodo IRIS móvil alimentado por baterías y configurado como

un nodo enrutador ZigBee. Este nodo ejecuta una aplicación que genera y transmite paquetes con una periodicidad y carga útil (*payload*) definidas por el usuario, y emula un nodo móvil transportado por un trabajador (por ejemplo, usando un cinturón) o por cualquier vehículo en movimiento por la planta (por ejemplo, una carretilla elevadora). El nodo receptor es un mote IRIS configurado como coordinador de red ZigBee y conectado a un PC a través de una placa interfaz, MIB520CA. La aplicación que se ejecuta en este nodo registra todos los paquetes recibidos y los reenvía hacia el PC a través de una conexión USB. En el PC, los paquetes recibidos son etiquetados con una marca temporal, y almacenados. También se almacena, para cada paquete recibido, información adicional como el nivel de señal recibida (RSSI, *Received Signal Strength Indicator*), el nivel de calidad del enlace (LQI, *Link Quality Indicator*) y el tipo, longitud e identificador de paquete.

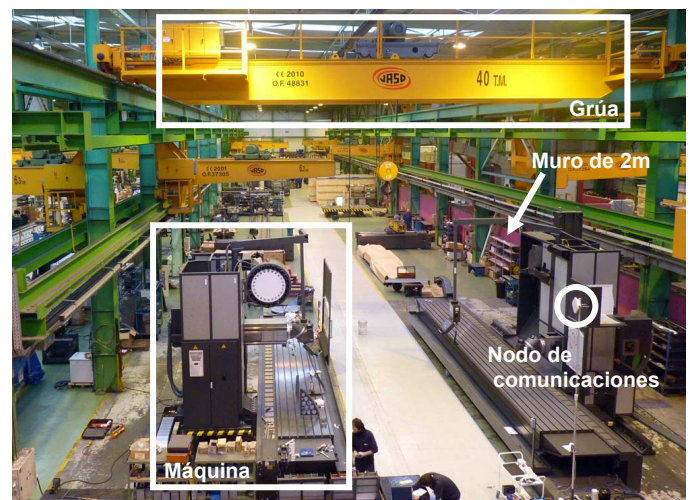


Fig. 2. Vista de uno de los pasillos en la fábrica de GORATU.

III. CONECTIVIDAD EN REDES SENSORIALES INALÁMBRICAS EN MOVILIDAD

Se han llevado a cabo más de 20 experimentos para evaluar los niveles de conectividad alcanzables en movilidad, considerando nodos móviles que representan a un trabajador (o vehículo industrial) desplazándose por el interior de una fábrica. En los experimentos, el nodo receptor se encontraba en la posición A de la Fig. 3, con la antena a una altura de $h_R=5m$. Este nodo emula un nodo estacionario desplegado estratégicamente en una ubicación con buenas condiciones de propagación con las distintas áreas de la planta. Con esta altura de antena, obstáculos como paredes de baja altura y piezas metálicas o equipos a nivel de suelo se pueden evitar parcialmente, aunque las grúas a diferentes alturas aún pueden reducir las condiciones de visibilidad entre el transmisor y el receptor. Durante los experimentos, el nodo transmisor, con la antena situada a una altura de $h_T=1.2m$, recorrió diferentes áreas de la planta a la velocidad típica de un trabajador. Este nodo se configuró para transmitir periódicamente cada $T=20ms$ un paquete con 100bytes de datos. La Fig. 3 muestra el recorrido realizado por el nodo transmisor, empezando en el punto A (cerca del nodo receptor) y, a continuación, pasando por el punto B hasta el punto L en orden alfabético.

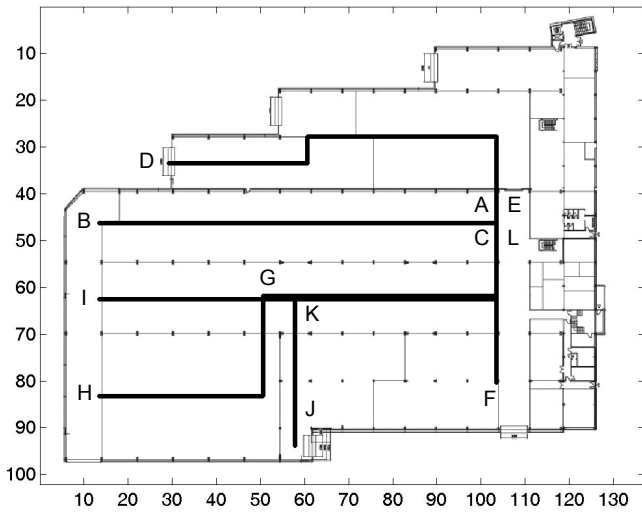


Fig. 3. Recorrido del nodo transmisor por la fábrica de GORATU.

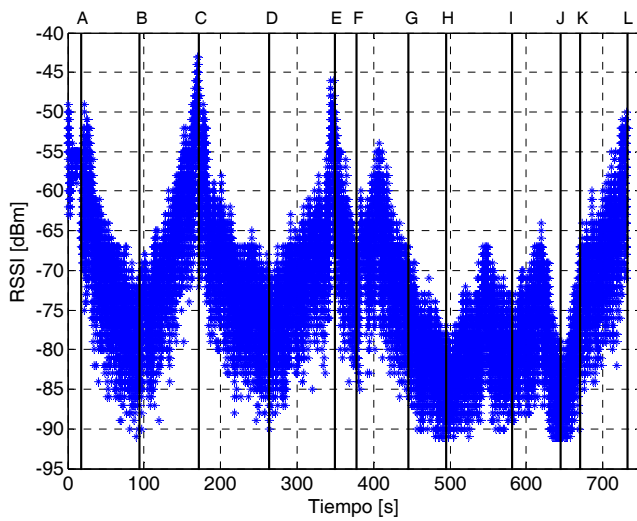


Fig. 4. RSSI de los paquetes recibidos durante el recorrido del nodo transmisor por la fábrica de GORATU. $P_t=3\text{dBm}$, $h_T=1.2\text{m}$, $h_R=5\text{m}$, $T=20\text{ms}$, $\text{payload}=100\text{Bytes}$.

La Fig. 4 muestra el RSSI de todos los paquetes recibidos en función del tiempo transcurrido para uno de los experimentos realizados. Para asociar los valores medidos a los lugares identificados en la Fig. 3, se han marcado los instantes de tiempo en los que se alcanzan dichas posiciones en la parte superior de la Fig. 4 (A, B, C, etc.). A lo largo de su recorrido, el nodo móvil experimenta condiciones de propagación diferentes, que van desde puntos con visión directa (LOS) reducida (puntos B y F), NLOS parcial debido a las grúas, pilares y maquinaria (puntos D, G, I y K), NLOS debido a múltiples elementos obstructores y a la larga distancia (punto H), y NLOS con alta obstrucción (punto J, almacén). Las diferentes condiciones de propagación experimentadas en las diferentes áreas de la fábrica influyen fuertemente en la pérdida de propagación y en la variabilidad de la señal resultante como se muestra en la Fig. 4. La pérdida de la señal y la variabilidad también afectan a la conectividad móvil medida como se indica en la Fig. 5. En la Fig. 5 se muestra el PER medido cada 5 segundos en los nodos móviles y el PER acumulado durante el recorrido. El nivel PER acumulado fue inferior al 1.5% durante todo el experimento, mientras que se obtuvieron niveles cercanos al 9% de forma instantánea en los puntos H (98m entre transmisor y receptor), y J (70m entre transmisor y receptor, almacén). Los resultados

obtenidos demuestran que se pueden garantizar buenos niveles de conectividad para nodos sensores móviles. Estos niveles podrían incluso mejorarse, por ejemplo con una optimización de la posición del nodo receptor en la fábrica, con el uso de amplificadores de potencia de RF o con el establecimiento de una red mallada con múltiples nodos que puedan reenviar mensajes mediante comunicaciones *multihop*.

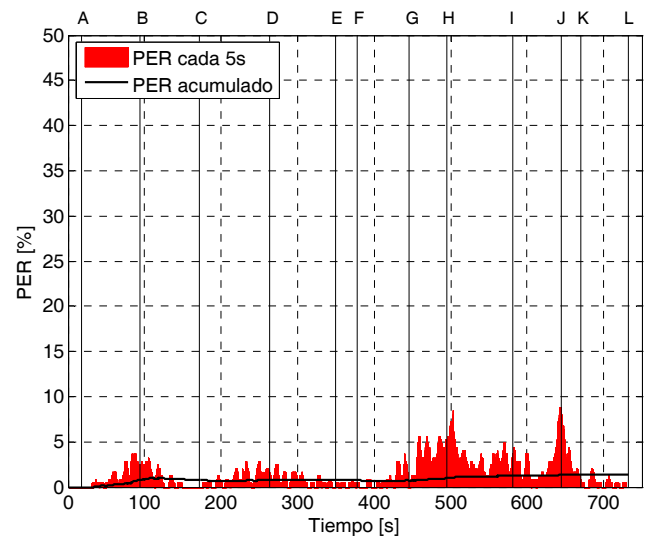


Fig. 5. Tasa de paquetes erróneos (PER, *Packet Error Rate*) experimentada por el nodo móvil transmisor desplazándose a través de la fábrica de GORATU. $P_t=3\text{dBm}$, $h_T=1.2\text{m}$, $h_R=5\text{m}$, $T=20\text{ms}$, $\text{payload}=100\text{Bytes}$

IV. CASO DE USO PARA PREVENCIÓN DE COLISIONES

Los socios industriales del consorcio FASyS han identificado 54 casos de usos o aplicaciones que representan problemas típicos y situaciones peligrosas presentes actualmente en las fábricas, y que podrían abordarse con las soluciones tecnológicas de FASyS. Los casos de uso identificados incluyen, entre otros, la activación inteligente de alarmas, protocolos de actuación primaria o la monitorización de aspectos relacionados con la ergonomía. Algunas de las aplicaciones y casos de uso identificados pueden beneficiarse con el uso de la plataforma heterogénea de comunicaciones inalámbricas de FASyS. Uno de estos casos de uso se centra en prevenir colisiones entre trabajadores y cualquier tipo de vehículo dentro de una fábrica, como carretillas elevadoras. Para ello, FASyS está investigando la posibilidad de equipar a trabajadores y vehículos con dispositivos inalámbricos que puedan establecer un enlace de comunicaciones e intercambiar información acerca de su posición y velocidad. Con esta información, podrían ser capaces de detectar por adelantado e incluso evitar estas situaciones potencialmente peligrosas. La implementación final de este caso de uso requeriría resolver problemas técnicos adicionales que están siendo investigados en FASyS, como el diseño de una Interfaz Hombre-Máquina (HMI, *Human-Machine Interface*) y soluciones de localización en interiores. Sin embargo, el primer paso para llegar a dicha solución final es el análisis de la fiabilidad de los enlaces inalámbricos de comunicaciones que puedan establecerse entre dos nodos con riesgo de colisión. Con este objetivo, se han realizado experimentos emulando este caso de uso en GORATU. En los experimentos realizados, dos nodos móviles emulan una colisión en la intersección mostrada en la Fig. 6. Esta ubicación fue elegida debido a sus adversas condiciones de propagación y visibilidad causadas por un

muro, maquinaria metálica y grandes elementos obstructores metálicos dentro de dos contenedores de madera. Uno de los nodos (con una altura de antena de $h_w=1.2m$) emula el movimiento de los trabajadores, mientras que el segundo nodo (con una altura de antena de $h_f=1.8m$) emula el movimiento de una carretilla elevadora moviéndose a una velocidad superior a la del trabajador.

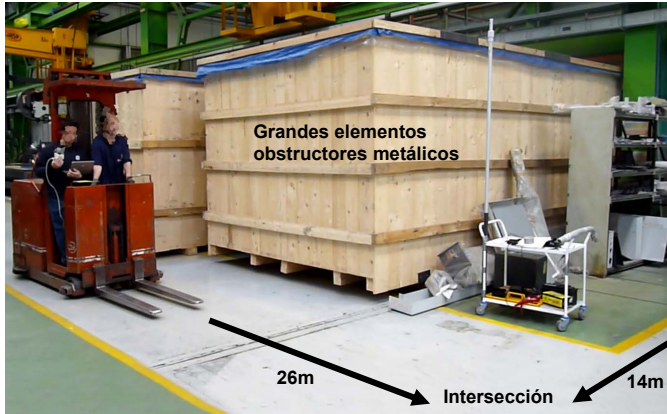


Fig. 6. Imagen de GORATU con las trayectorias de los dos nodos emulando el caso de uso de detección de colisión.

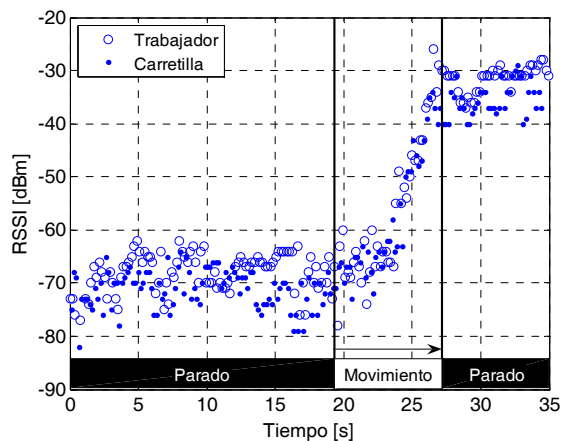


Fig. 7. Nivel RSSI de los paquetes recibidos durante la representación del caso de uso para prevención de colisiones. $P_t=3dBm$, $h_w=1.2m$, $h_f=1.8m$, $T=200ms$, $payload=50Bytes$.

Se realizaron 9 iteraciones del mismo experimento considerando la transmisión de un paquete cada $T=200ms$ con un $payload$ de 50Bytes y una potencia de transmisión de 3dBm. La Fig. 7 muestra el RSSI para todos los paquetes recibidos tanto por el trabajador como por la carretilla elevadora. Las líneas verticales representan los instantes de tiempo en los que los nodos inician y detienen el movimiento. Los valores RSSI obtenidos son similares en los dos nodos demostrando así la simetría del enlace entre ellos. La figura muestra también valores de RSSI relativamente estables cuando ambos nodo se encuentran detenidos. Sin embargo, se produce un aumento de aproximadamente 40dB a lo largo de la fase de movimiento. Este incremento es debido a una menor distancia entre los nodos y una menor influencia de los elementos obstructores a medida que avanzan hacia la zona de colisión. A pesar de la reducida visibilidad y de las adversas condiciones de propagación entre los dos nodos durante los experimentos, se recibieron correctamente todos los paquetes transmitidos. Como resultado, es posible establecer una conexión inalámbrica

robusta entre los dos nodos con tiempo suficiente para que el conductor/trabajador reaccione y evite la colisión. Estos resultados demuestran que el uso de comunicaciones inalámbricas puede representar una solución muy atractiva para establecer enlaces entre nodos móviles y evitar colisiones en entornos industriales.

V. CONCLUSIONES

El desarrollo del concepto de Fábrica del Futuro (FoF) debe contener entre sus puntos clave la mejora de la seguridad y la salud de los trabajadores. En este contexto, las redes sensoriales inalámbricas ofrecen un enorme potencial para la monitorización en tiempo real del entorno de trabajo y las condiciones de los trabajadores, así como para la detección anticipada de situaciones potencialmente peligrosas. Sin embargo, el despliegue de soluciones inalámbricas de bajo consumo y bajo coste en entornos industriales esta condicionado por las adversas condiciones de propagación radio que podrían degradar la calidad de su transmisión. Diferentes estudios han analizado y caracterizado los diferentes efectos de propagación que se pueden encontrar en entornos industriales, pero pocos trabajos han analizado hasta la fecha las condiciones de propagación y conectividad de dispositivos móviles de monitorización. En este contexto, este artículo ha presentado diferentes experimentos realizados en una fábrica para analizar la viabilidad y la calidad de las transmisiones de IEEE 802.15.4/ZigBee. Estos experimentos han demostrado que se pueden lograr buenos niveles de conectividad para aplicaciones de monitorización con nodos móviles basadas en IEEE 802.15.4/ZigBee y que esta tecnología puede ser una candidata viable para desarrollar innovadores casos de uso de salud y seguridad, como la prevención de colisiones.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación a través del proyecto CENIT FASyS (CEN-20091034). Los autores agradecen a Agustín Prado y a GORATU su apoyo durante la campaña de medidas.

REFERENCIAS

- [1] Web oficial del proyecto FASyS: <http://www.fasys.es/>
- [2] T. S. Rappaport, C. D. McGillem, "UHF fading in factories", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 7, No. 1, pp. 40-48, 1989.
- [3] E. Tanghe, et. al, "The industrial indoor channel: large-scale and temporal fading at 900, 2400, and 5200 MHz", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol.7, no.7, pp.2740-2751, July 2008.
- [4] E. Tanghe, et. al, "Statistical validation of WLAN range calculated with propagation models for industrial environments by chipset-level received signal strength measurements", *IET Science, Measurement & Technology*, vol.3, no.3, pp.244-255, May 2009.
- [5] N. Assous, et. al, "Wireless Sensors for Instrumented Machines: Propagation Study for Stationary Industrial Environments", *IEEE International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD)*, pp. 1-5, 2009.
- [6] J. D. Birdwell, et. al, "Propagation modeling in a manufacturing environment", *Workshop on Wireless Communications for Improved Manufacturing*, 1995.
- [7] L. Zheng, "ZigBee Wireless Sensor Network in Industrial Applications", *SICE-ICASE International Joint Conference*, Bexco, Busan, Korea, Oct. 2006.
- [8] J. Vales-Alonso, et. al, "An IEEE 802.11 protocol test-bed in industrial environments using personal computing devices", *IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON)*, pp. 655-659, May 2006.