

Evaluación de Comunicaciones Heterogéneas para el Despliegue de Redes de Sensores en Entornos Industriales

Miguel Sepulcre¹, José Antonio Palazón Selva¹, Javier Gozalvez¹,
Jaime Orozco², Oscar López³, Etxahun Sánchez³

¹Uwicore, Ubiquitous Wireless Communications Research Laboratory
Universidad Miguel Hernández de Elche, Avda. de la Universidad s/n, 03202 Elche, España,
msepulcre@umh.es, jpalazon@umh.es, j.gozalvez@umh.es

²INDRA Sistemas, S.A. C/ Anabel Segura, 7, 28108 Madrid, España, jorozcog@indra.es

³NEXTEL, S.A. Parque Tec. Edif. 207, 48170 Zamudio, España, olopez@nextel.es, esanchez@nextel.es

Abstract — Mejorar la seguridad y la salud de los trabajadores es una de las prioridades fundamentales en el diseño y desarrollo del concepto de Fábrica del Futuro (FoF). Con este objetivo, las TIC en general y las tecnologías inalámbricas de comunicación en particular, proporcionan herramientas valiosas para la implementación de aplicaciones de sensado distribuidas y en movilidad capaces de monitorizar continuamente el entorno de trabajo, la salud de los trabajadores y sus condiciones de seguridad. Sin embargo, las adversas condiciones de propagación que caracterizan los entornos industriales pueden dificultar la implementación eficiente y fiable de soluciones inalámbricas en las fábricas. En este contexto, este trabajo evalúa la fiabilidad y conectividad de diversas tecnologías inalámbricas que podrían ser empleadas para la implementación de aplicaciones de sensado fijas y móviles en entornos industriales.

I. INTRODUCCIÓN

El concepto Europeo de Fábrica del Futuro (FoF, *Factory of the Future*) se centra en el desarrollo e integración de tecnologías de ingeniería, tecnologías de la información y comunicación (TIC), y materiales avanzados para máquinas adaptables y procesos industriales. En este nuevo marco, los trabajadores representan el activo más importante para la competitividad y productividad del proceso de fabricación, y deben tomarse todas las medidas necesarias para mejorar su salud y seguridad en su entorno de trabajo. Con este objetivo, se ha creado el proyecto FASyS (Fábrica Absolutamente Segura y Saludable) [1] bajo la iniciativa española CENIT para desarrollar un nuevo modelo de fábrica que reduzca al mínimo los riesgos para la salud y la seguridad de los trabajadores, y garantice su bienestar y comodidad en fábricas de mecanizado, manipulación y montaje. Para lograr sus objetivos, el proyecto debe abordar varios aspectos como el desarrollo de protocolos de prevención, soluciones de monitorización de salud personalizadas, técnicas de procesamiento de datos relacionados con la salud y la inteligencia necesaria para el análisis y la toma de decisiones, entre otros. Un componente tecnológico clave de FASyS es el despliegue de una red inalámbrica heterogénea *end-to-end* que monitorizará continuamente, tanto de forma local como remota, el entorno de trabajo y la salud y condiciones fisiológicas del trabajador. El sistema de comunicaciones heterogéneas integrará capacidades de comunicación de corto, medio y largo alcance para satisfacer las necesidades de monitorización ubicua y grandes demandas de ancho de banda que impone un sistema de seguridad distribuido en tiempo real como el propuesto.

El desarrollo de una plataforma de comunicaciones inalámbricas heterogénea presenta desafíos importantes. Por un lado, los entornos industriales generalmente se caracterizan por difíciles condiciones de propagación (obstrucciones, interferencias, etc.) que dificultan el establecimiento de enlaces inalámbricos robustos. Por otro lado, las arquitecturas de red híbridas plantean desafíos importantes a la hora del diseño de una plataforma que administre los datos de forma eficiente, en particular cuando la conectividad en tiempo real debe garantizarse a través de múltiples tecnologías inalámbricas. Además, la capacidad de monitorizar de forma ubicua las condiciones de los trabajadores requiere una plataforma de comunicaciones y sensado con nodos móviles.

Como paso previo al dimensionado y la implementación de una solución inalámbrica heterogénea, es necesario analizar la propagación, conectividad y condiciones de Calidad de Servicio (QoS) que experimentan las diversas tecnologías en entornos industriales. Diferentes estudios han analizado ciertos aspectos de propagación de radio en entornos industriales. Por ejemplo, el trabajo en [2] presenta un gran número de medidas de propagación en banda estrecha realizadas en cinco fábricas en la banda de frecuencia de 1282MHz (con alturas de antena de 2m tanto para el transmisor como para el receptor). [3] extiende la caracterización de canal de radio en entornos industriales a otras bandas de frecuencia (900MHz, 2400MHz y 5200MHz) emulando un despliegue práctico de terminales y puntos de acceso inalámbricos (la altura de la antena en este estudio era de 6m para el transmisor y de 2m para el receptor). En [4], los autores evalúan el rendimiento de una red de sensores inalámbricos IEEE 802.15.4/ZigBee compuesta por 20-30 nodos estáticos. El estudio obtuvo niveles de fiabilidad por encima de 99.5% con despliegues de nodos adecuados. Otros estudios como [5] y [6] evalúan la tasa de error y la latencia de dispositivos IEEE 802.11 en entornos industriales. Todos estos estudios demuestran que es posible proporcionar conectividad inalámbrica en entornos industriales, pero también destacan ciertas peculiaridades que deben considerarse y otras cuestiones que aún deben

ser analizadas. Asimismo, los estudios realizados hasta la fecha utilizan generalmente nodos estáticos, mientras que para futuras aplicaciones de sensado en movilidad se requerirán soluciones a los problemas que plantea dicha movilidad de los nodos y las consiguientes variaciones en las condiciones de propagación. En este contexto, este artículo presenta los resultados de una campaña de medidas que evalúa los niveles de rendimiento y conectividad de dispositivos inalámbricos estáticos y móviles basados en el estándar IEEE 802.15.4/ZigBee, así como la calidad de las tecnologías WiMAX y UMTS/HSDPA que formarán parte de la plataforma de comunicación heterogénea de FASyS.

II. ENTORNO DE PRUEBA INDUSTRIAL INALÁMBRICO

La campaña de medidas se ha realizado en la planta principal 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 y una altura del edificio de unos 11 metros aproximadamente (Fig. 1a). El interior de la planta consta principalmente de amplios pasillos y grandes zonas normalmente separadas por muros de hormigón de 2m de altura aproximadamente que no alcanzan el techo. Los pasillos son zonas de montaje de maquinaria y tienden a estar ocupados por grandes piezas metálicas. Cada pasillo posee varias grúas que son capaces de levantar y transportar piezas de grandes dimensiones (Fig. 1b). Como se muestra en la Fig. 1b, la planta se caracteriza por la presencia de un gran número de obstáculos metálicos que podrían influir en la conectividad inalámbrica.

La planta está situada cerca de tres Estaciones Base (EB) que proporcionan cobertura GSM y UMTS/HSDPA a la ciudad de Elgoibar. Pese a estar situada en un valle, rodeada de colinas, la planta tiene buenas condiciones de visibilidad con una de las EB, situada a menos de 300m (Fig. 2).

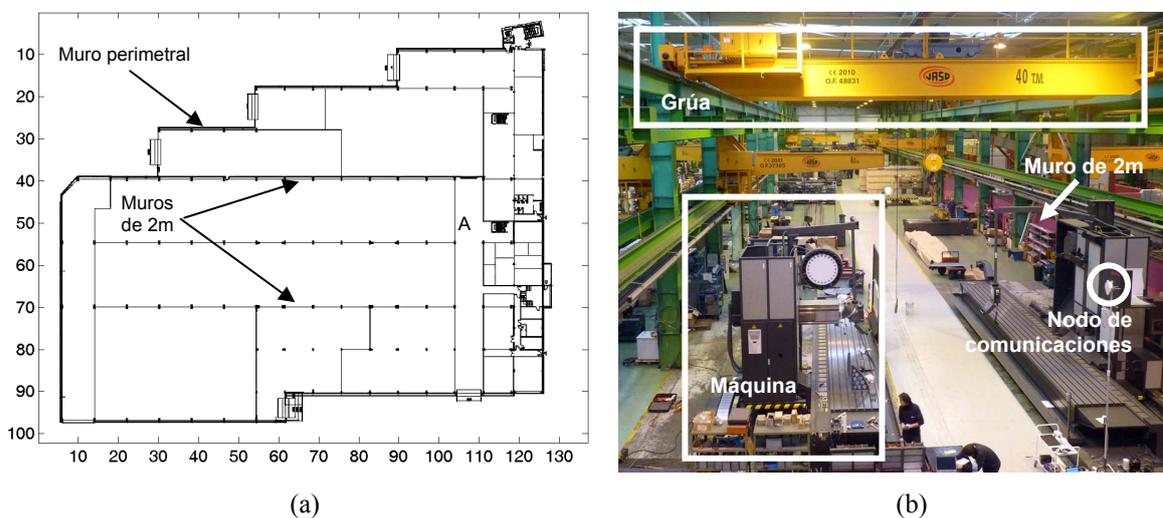


Figura 1. Fábrica principal de GORATU.

(a) Plano de la planta (ejes en metros). A indica el punto donde fue tomada la fotografía. (b) Vista de uno de los pasillos de la planta.



Figura 2. Estaciones base celulares cercanas a la fábrica principal de GORATU.

La plataforma heterogénea de comunicaciones inalámbricas FASyS está siendo diseñada para posibilitar el sensado local del entorno físico y las condiciones de los trabajadores, y transmitir los datos sensados a un centro de control a través de un enlace de *backhaul* inalámbrico. El *backhaul* inalámbrico puede incluir tecnologías de medio alcance para las comunicaciones dentro de la fábrica y tecnologías de largo alcance para la transferencia de los datos al centro de control. La capacidad de monitorizar localmente y en tiempo real el entorno físico y las condiciones de los trabajadores requiere el uso de una tecnología inalámbrica de bajo coste y consumo que pueda funcionar adecuadamente en condiciones de baja y media movilidad. En este contexto, FASyS ha adoptado el empleo de redes inalámbricas de sensores (WSN, *Wireless Sensor Network*) como solución de comunicación local. El proyecto inicialmente está trabajando con el estándar IEEE 802.15.4/ZigBee, pero también planea integrar tecnologías WirelessHART e ISA100.

Además de soluciones de sensado distribuidas basadas en IEEE 802.15.4/ZigBee, FASyS también incluye aplicaciones de sensado mediante video que requieren un mayor ancho de banda de comunicación. En este contexto, FASyS propone una arquitectura jerárquica de comunicaciones donde el *backhaul* inalámbrico integrará tecnologías de comunicación de media y larga distancia. Las tecnologías de media distancia (WiFi y WiMAX) serán las encargadas de transmitir los datos de video junto con los datos sensados a nivel local de diferentes áreas de la fábrica (pueden agregarse los datos sensados localmente) hacia la pasarela de la fábrica. Esta pasarela estará interconectada a través de tecnologías de comunicación de larga distancia a un centro de control remoto. Dependiendo de los requisitos de ancho de banda final, FASyS está considerando WiMAX y UMTS/HSDPA para la conexión de la pasarela de la fábrica hacia el centro de control.

III. CONECTIVIDAD INALÁMBRICA DE LA RED DE SENSORES

A. Equipamiento.

Para los experimentos se utilizaron 2 motes modelo IRIS del fabricante MEMSIC (transmisor y receptor) trabajando en la banda de frecuencia de 2.4GHz. Los motes se caracterizan por una velocidad de datos máxima teórica de 250kbps, una sensibilidad del receptor de -101dBm y una potencia máxima de RF de 3dBm. Los motes IRIS implementan las capas PHY y MAC definidas en el estándar IEEE 802.15.4 y la capa de red y superiores compatibles con Zigbee. Los motes incluyen una placa de procesamiento (XM2110) basada en el microcontrolador ATmega1281 (Atmel) de bajo consumo.

En los experimentos realizados, el nodo transmisor es un mote MEMSIC IRIS alimentado por baterías estándar 2xAA y configurado como un enrutador Zigbee. Este nodo ejecuta una aplicación que genera y transmite paquetes con un periodo y *payload* definidos por el usuario, emulando un nodo sensor fijo o móvil (por ejemplo, llevado por un trabajador con un cinturón o por cualquier vehículo en movimiento en la planta). El nodo receptor es un mote configurado como un coordinador de red Zigbee, conectado a un PC a través de una tarjeta interfaz MIB520CA. La aplicación que se ejecuta en este nodo registra todos los paquetes recibidos retransmitiéndolos al PC a través de USB (mediante un puerto COM virtual). En el PC, los paquetes recibidos son etiquetados y registrados con una marca temporal para su posterior análisis. También se almacena para cada paquete recibido 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.

B. Resultados

Para evaluar la conectividad inalámbrica entre diferentes nodos, el nodo receptor se situó en la posición *FR* en la Fig. 3a, con la antena a una altura de $h_R = 5\text{m}$. Este nodo emula un nodo estático desplegado estratégicamente en una ubicación con buenas condiciones de propagación con las distintas áreas de la planta. Con la antena a esta altura se evitan parcialmente obstáculos como paredes de baja altura y piezas metálicas o equipos a nivel de suelo, aunque las grúas a diferentes alturas aún pueden reducir las condiciones de visibilidad entre el transmisor y el receptor. El rendimiento del estándar IEEE 802.15.4/Zigbee fue analizado en primer lugar considerando el nodo transmisor fijo en diferentes posiciones de la planta (*FA*, *FB*, *FC* y *FD* en la Fig. 3a, donde es de destacar que *FD* se encuentra dentro de un almacén) con la antena a una altura entre 1.6m y 2m. El despliegue emula nodos de sensado inalámbrico fijos situados en ubicaciones específicas, por ejemplo, maquinaria que podría representar un riesgo para la seguridad de los trabajadores. En los experimentos, el nodo transmisor transmite un paquete de datos cada 20ms con una potencia de 3dBm y un *payload* de 100Bytes. La Fig. 3b muestra los niveles RSSI medidos en las cuatro posiciones fijas. El nivel más alto de la señal recibida se produce en la ubicación *FA* (a una distancia de 85m desde el nodo receptor) dado el menor número de obstáculos entre los dos nodos. Los niveles RSSI medidos en posiciones *FB*, *FC* y *FD* (a una distancia de 77m, 108m y 59m del nodo receptor, respectivamente) no difieren significativamente entre sí. La tasa de error de los paquetes recibidos (PER, *Packet Error Rate*) resultante en los diferentes lugares fue sistemáticamente inferior al 3%.

También se realizaron diferentes pruebas para evaluar la conectividad inalámbrica entre un nodo móvil emulando un trabajador (o vehículo industrial) moviéndose alrededor de la fábrica y un nodo fijo emulando un punto de acceso. Mientras el nodo fijo receptor se encontraba en *FR* con la antena situada a una altura de $h_R = 5\text{m}$ (ver Fig. 3a), el nodo transmisor, con la antena a una altura de $h_T = 1.2\text{m}$, se desplazó a través de diferentes áreas de la planta a la velocidad típica de un trabajador. Al igual que para las pruebas con puntos fijos, se ha configurado el nodo transmisor para que transmita periódicamente un

paquete de datos cada 20ms con un *payload* de 100bytes. La Fig. 3a muestra el recorrido realizado por el nodo transmisor, empezando en el punto *M1* (cerca del nodo receptor *FR*) y, a continuación, pasando punto por punto desde *M2* hasta *M12* en orden ascendente. La Fig. 4 muestra los niveles RSSI registrados durante las pruebas para nodos móviles, junto con la distancia entre el transmisor y el receptor. El nivel de señal medido a lo largo del recorrido presenta variaciones entre -45dBm y -91dBm (el nivel mínimo que puede medirse con este chip radio). En este contexto, es interesante observar las altas diferencias entre los niveles de señal medidos en las posiciones fijas con alturas altas de antena (Fig. 3b) y a los obtenidos en condiciones de movilidad peatonal con una menor altura de antena. En particular, los niveles de RSSI medidos en los puntos móviles *M_i* (Fig. 4) presentan mayor atenuación y variabilidad que los niveles obtenidos para los puntos fijos *F_i* (Fig. 3b). Por ejemplo, en el punto *M2* se observan valores de RSSI entre -70dBm y -85dBm mientras que los valores observados en el punto *FA* oscilan desde -72dBm a -79dBm. Se puede llegar a las mismas conclusiones si se comparan los valores de RSSI medidos en *FB* con *M8-M9*, *FC* con *M7*, o *FD* con *M11*. Estos resultados ofrecen unas primeras indicaciones sobre las diferencias en cuanto a calidad de enlace entre nodos fijos y móviles en entornos industriales. El desarrollo de aplicaciones de detección para mejorar la seguridad y la salud de los trabajadores requiere, por tanto, un diseño y dimensionado más cuidadoso de protocolos y sistemas de comunicación inalámbrica.

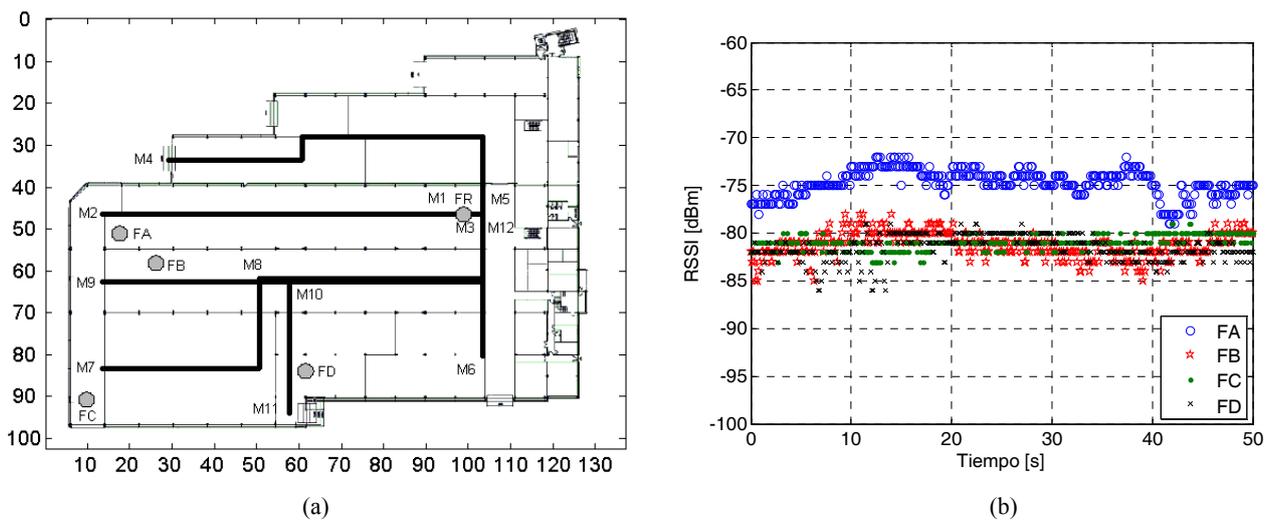


Figura 3. (a) Posición y trayectoria del nodo transmisor IEEE 802.15.4/Zigbee a través de la fábrica de GORATU en los experimentos con nodos fijos y móviles. (b) Niveles de RSSI medidos en las pruebas de IEEE 802.15.4/Zigbee para nodos fijos.

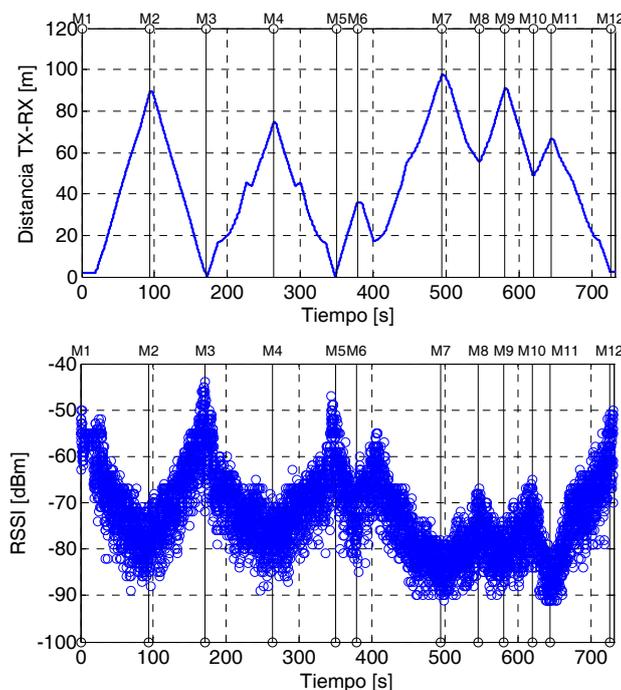


Figura 4. Distancia TX-RX (transmisor-receptor) y niveles de RSSI medidos en las pruebas de IEEE 802.15.4/Zigbee para nodos móviles.

La Fig. 5 muestra el PER medido durante las pruebas con nodos móviles. En particular, la figura muestra el PER medido en los últimos cinco segundos, y el PER acumulado resultante. Como se puede observar, se han obtenido valores relativamente bajos de PER a lo largo del recorrido por toda la fábrica, siendo los puntos más lejanos los que presentan peores valores de PER (*M2*, *M4*, *M7*, *M9* y *M11*; *M11* se encuentra en el almacén). Sin embargo, cabe destacar las diferencias entre los valores de PER obtenidos durante las pruebas para nodos fijos y móviles. Mientras que en las pruebas con nodos transmisores fijos solamente se perdieron paquetes esporádicos, más de un 8% de paquetes fueron recibidos con error cuando los nodos móviles alcanzaron las posiciones *M7* y *M11* (posiciones cercanas a *FC* y *FD*, respectivamente). Estos resultados demuestran los retos que se deben afrontar con el fin de implementar soluciones móviles de detección de manera eficiente y fiable en entornos industriales, y la necesidad de diseñar técnicas avanzadas de comunicación y de redes que superen la degradación que se ha observado bajo condiciones de movilidad.

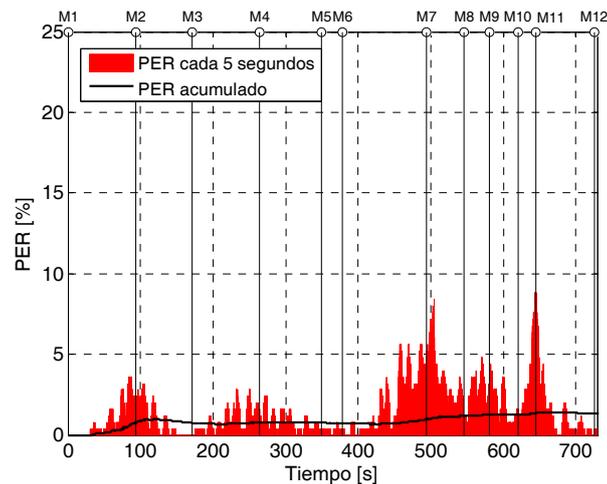


Figura 5. PER medido en las pruebas de IEEE 802.15.4/Zigbee para nodos móviles.

Una posibilidad para mejorar el rendimiento y la fiabilidad de la transmisión de datos en condiciones móviles consiste en aumentar la potencia de transmisión. La potencia máxima permitida en la banda de 2.4GHz para IEEE 802.15.4 es de 17dBm. Tal nivel de potencia puede lograrse con los motes seleccionados utilizando el amplificador de potencia CC2591 de Texas Instruments para la banda de 2.4GHz. Con este amplificador de potencia, los valores medidos de RSSI aumentaron alrededor de 20dB en los experimentos con nodos móviles. Como resultado, el PER mejoró significativamente. La Fig. 6 muestra el PER medido por el nodo móvil al pasar de *M11* (almacén) a *M12* utilizando el amplificador de potencia. Como se puede observar, el PER se redujo significativamente en comparación con la Fig. 5 gracias al aumento de la potencia de transmisión. Sin embargo, a pesar de una mejora significativa del nivel de RSSI, se siguen recibiendo algunos paquetes con error. Además, el incremento de la potencia de transmisión reduce significativamente la duración de la batería afectando a la autonomía de los dispositivos. Por este motivo, se necesitarán crear soluciones más avanzadas para abordar los desafíos que presentan las comunicaciones inalámbricas con nodos móviles en entornos industriales.

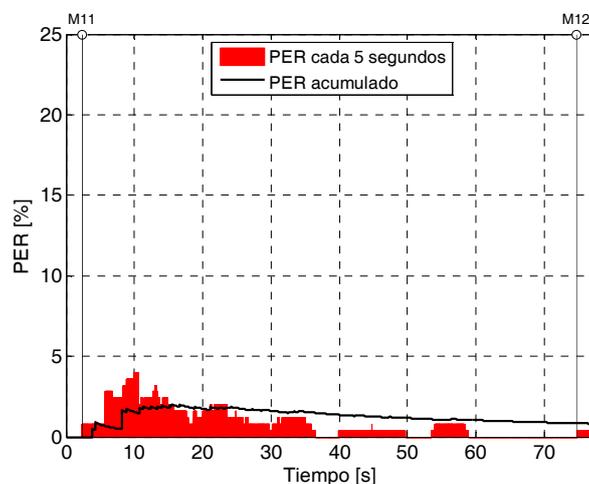


Figura 6. PER medido en las pruebas de IEEE 802.15.4/Zigbee para nodos móviles con mayor potencia de transmisión.

A. Equipamiento

En los experimentos realizados con WiMAX, se han utilizado dispositivos de la familia BreezeACCESS VL5.4 del fabricante Alvarion. En particular, se desplegaron en ubicaciones fijas de la fábrica el modelo AUS-E-SA-5.4-VL para la Unidad de Acceso (AU) y el modelo SU-A-5.4-VL para la Unidad de Suscriptor o Abonado (SU). Tanto la AU como la SU operan en la banda de frecuencias de 5.470 – 5.725GHz. Cada unidad estaba conectada a un ordenador portátil estándar. Además, la AU estaba conectada a una antena sectorial externa de 120° con 15dBi de ganancia (modelo AL-484034/NV). Aunque estas unidades se han configurado y utilizado para comunicaciones punto a punto, también pueden ser empleadas para transmisiones de punto a multipunto.

Para evaluar el rendimiento de la tecnología WiMAX, se ha utilizado el analizador de protocolos de red *Wireshark*. Esta herramienta es capaz de capturar y filtrar el tráfico Ethernet, y fue utilizada para capturar los paquetes de datos recibidos y de esta manera calcular el *throughput*. Además, esta herramienta se ha utilizado para capturar valores de RSSI, SNR (*Signal to Noise Ratio*) y *Noise Floor* adquiridos por la herramienta AlvariCRAFT. Al usar la herramienta AlvariCRAFT, estos parámetros son enviados periódicamente desde la AU hacia el portátil a través de la interfaz de Ethernet mediante el protocolo SNMP.

B. Resultados

El rendimiento de WiMAX en el interior de la fábrica ha sido evaluado a través de la transferencia FTP de un archivo de gran tamaño entre la AU y la SU. La AU se encuentra situada en el punto *A* de la Fig. 1a con la antena situada a una altura de $h_T=6\text{m}$. La SU se encontraba a la mayor distancia posible de la AU, es decir, en el punto *FC* (Fig. 3a). Para evaluar el impacto de las condiciones de visibilidad y de obstáculos cercanos en el despliegue de los equipos WiMAX, se han probado diferentes alturas para la antena de la SU. Los resultados presentados en la Fig. 7a, con una altura de antena para la SU de $h_R=5\text{m}$, muestran una medida de *throughput* sostenido de 37Mbps a pesar de la presencia de grúas y otros obstáculos entre la SU y la AU que influyen en la propagación radio. Los resultados representados en la Fig. 7a también muestran que la reducción de la altura de la antena de la SU a $h_R=1\text{m}$ disminuye el *throughput* promedio a 12Mbps e incrementa la inestabilidad de enlace. Estos efectos son debidos al mayor número de obstáculos presentes entre la AU y la SU (por ejemplo, maquinaria) que bloquean la señal de radio. De hecho, la medida SNR se redujo de 37.9dB a 24.7dB al reducir la altura de la antena, y el promedio de la medida del RSSI en el receptor también disminuyó de -47dBm a -60dBm. Estos resultados muestran que WiMAX puede proporcionar altos niveles de *throughput* en entornos industriales que necesiten transmisiones de video y transmisión de datos agregados de un gran número de sensores locales hacia el centro de control a través del nodo pasarela de la fábrica. En cualquier caso, es importante destacar que los niveles de *throughput* dependen fuertemente de un despliegue óptimo de los equipos de radio que minimice el impacto de los obstáculos cercanos. El impacto de los obstáculos y la importancia de una estrategia adecuada en el despliegue de los nodos se pueden observar cuando se analiza el tiempo transcurrido entre la recepción de paquetes consecutivos (Fig. 7b). Los resultados obtenidos muestran que al reducirse la altura de la antena se aumentó el número de obstáculos entre la AU y la SU, degradando la estabilidad del enlace y aumentando el tiempo entre paquetes de datos consecutivos.

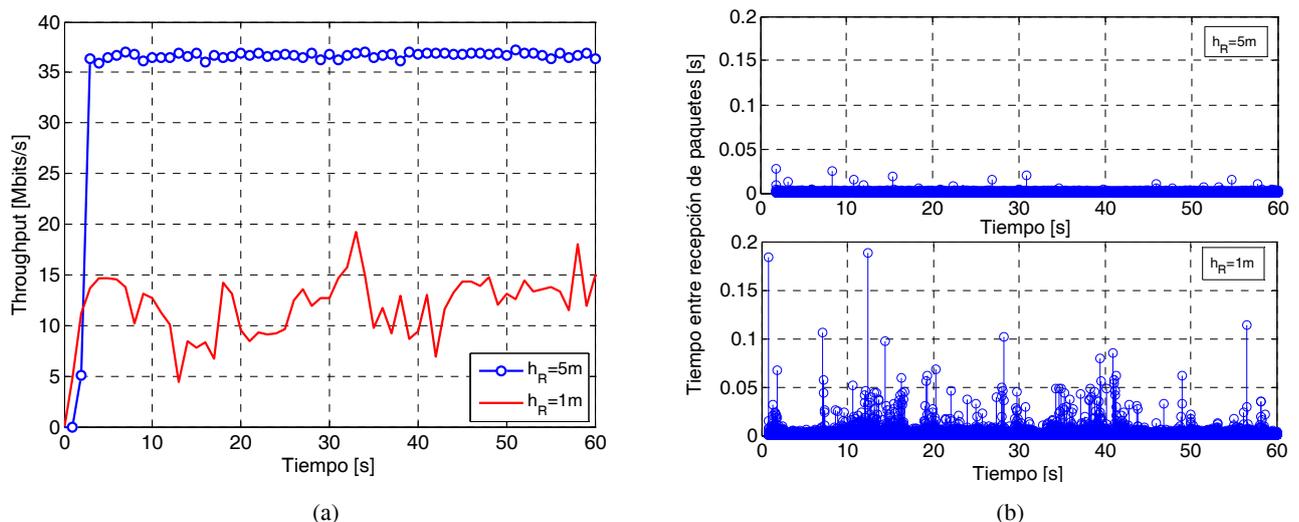


Figura 7. Rendimiento de la tecnología WiMAX. (a) *Throughput* y (b) tiempo entre paquetes recibidos consecutivos.

A. Equipamiento

Las capacidades de comunicación mediante UMTS/HSDPA se han medido utilizando el terminal 6720c de Nokia. Este terminal basado en Symbian incorpora una herramienta portátil de ingeniería para la medición y monitorización del interfaz radio de tecnologías celulares como GSM/GPRS y UMTS/HSDPA. Nemo Handy es capaz de medir y almacenar un gran número de parámetros, permitiendo el testeo de llamadas de voz y video llamadas, transferencias de datos FTP y HTTP, navegación HTML/WAP y transmisión de video. Los datos registrados durante las pruebas se han procesado utilizando la herramienta profesional Nemo Outdoor, que ofrece un valioso conjunto de indicadores de rendimiento como *throughput*, RSSI o BLER (*Block Error Rate*).

B. Resultados

El rendimiento de UMTS/HSDPA ha sido evaluado a través de una descarga de datos HTTP de un archivo de gran tamaño. La Fig. 8a muestra los niveles de RSSI obtenidos por el terminal móvil fuera y dentro de la fábrica en ubicaciones fijas. Las medidas en el exterior se realizaron con el terminal móvil situado en la azotea de la fábrica, y las medidas en el interior se llevaron a cabo en el pasillo que se muestra en la Fig. 1b. Los resultados de la Fig. 8a muestran que el nivel de la señal se reduce significativamente debido a la atenuación producida por el propio edificio y los obstáculos presentes en el interior de la fábrica. De hecho, la medida de RSSI dentro de la fábrica es 8dB inferior en promedio al nivel obtenido en la azotea, aunque la variabilidad de la señal es ligeramente inferior en el interior (10.2dB frente a 8.8dB entre los percentiles 5% y 95%).

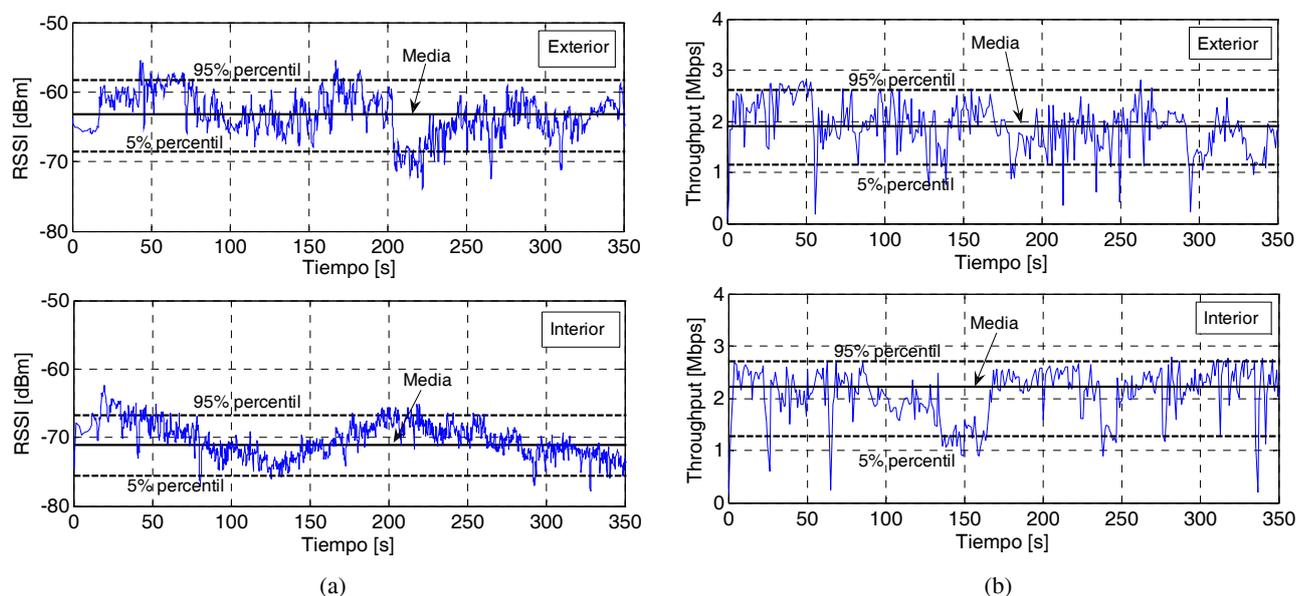


Figura 8. Rendimiento de la tecnología UMTS/HSDPA. (a) RSSI y (b) *Throughput*.

En la Fig. 8b se muestra los niveles instantáneos de *throughput* experimentados en las pruebas realizadas, junto con la media y los percentiles 5% y 95%. Estos resultados muestran que a pesar de la degradación de RSSI medido en interior, el sistema es capaz de proporcionar niveles promedio de *throughput* similares tanto en interior como en exterior. Para obtener estos niveles de *throughput* similares, la tecnología celular adapta sus parámetros de transmisión (potencia de transmisión, esquema de modulación/codificación, etc.), y utiliza mecanismos avanzados de gestión de recursos radio para compensar las condiciones de degradación en la calidad del enlace que se obtienen en el interior de la fábrica. De hecho, el nivel de potencia utilizado por el terminal durante las pruebas en interior fue en promedio de 8.55dB superior en la prueba de interior en comparación con la de exterior. Por otra parte, para compensar la degradación de calidad del enlace en el interior, la red celular asignó los recursos radio durante el 91.25% del tiempo que duró la prueba en el interior, mientras que en las pruebas de exterior este porcentaje se redujo al 83.9%. Estos resultados muestran que las tecnologías celulares pueden representar una solución viable y atractiva para implementar el *backhaul* inalámbrico de la plataforma FASyS, ya que no requieren el despliegue adicional de equipos radio, y sus interfaces radio pueden adaptar de forma eficiente su funcionamiento en función de las condiciones de calidad experimentadas en el canal para proporcionar niveles estables y con un valor de *throughput* relativamente alto. Una alternativa a estos sistemas celulares para el *backhaul* inalámbrico sería WiMAX que, como se ha mostrado, puede proporcionar niveles muy elevados de *throughput* con una implementación adecuada, aunque requiere una mayor inversión inicial.

VI. CONCLUSIONES

Las tecnologías de sensado móvil distribuidas pueden ofrecer soluciones interesantes para desarrollar aplicaciones avanzadas de monitorización industriales. En este contexto, el consorcio FASyS está trabajando en nuevas soluciones para mejorar las condiciones de seguridad y salud de los trabajadores a través de una plataforma inalámbrica heterogénea que integra tecnologías de la comunicación de corto, medio y largo alcance. Mientras las tecnologías de corto alcance permitirán funcionalidades de detección/sensado, las tecnologías de medio y largo alcance constituirán la espina dorsal de un *backhaul* inalámbrico eficiente y escalable que conectará el entorno de la fábrica con el centro de control remoto donde las condiciones de seguridad puedan controlarse eficazmente para detectar condiciones de riesgo e identificar las contramedidas necesarias.

La implementación de soluciones inalámbricas en entornos industriales esta condicionada por las duras condiciones de propagación de radio que podrían degradar la calidad de las comunicaciones. En este contexto, este documento presenta algunos resultados de una amplia campaña de medidas dirigida a analizar la capacidad de varias tecnologías inalámbricas para proporcionar los niveles de fiabilidad y conectividad necesarios por FASyS para implementar sus aplicaciones de seguridad y salud. Los resultados obtenidos revelan que tanto IEEE 802.15.4/Zigbee, como las tecnologías WiMAX y UMTS/HSDPA podrían ser candidatas viables y atractivas. Sin embargo, los experimentos realizados han demostrado que para aplicaciones de detección móvil en entornos industriales se requieren soluciones de comunicaciones avanzadas para satisfacer los requisitos de conectividad y tiempo real impuestos por las aplicaciones de seguridad y salud en entornos industriales.

AGRADECIMIENTOS

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

REFERENCIAS

- [1] Proyecto FASyS, web oficial: <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] L. Zheng, "ZigBee Wireless Sensor Network in Industrial Applications", SICE-ICASE International Joint Conference, Bexco, Busan, Korea, Oct. 2006.
- [5] J. Vales-Alonso, et. al, "An IEEE 802.11 protocol test-bed in industrial environments using personal computing devices", Proceedings of the IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON), pp. 655-659, May 2006.
- [6] A. Willig, et. al, "Measurements of a wireless link in an industrial environment using an IEEE 802.11-compliant physical layer", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.49, no.6, pp. 1265- 1282, Dec. 2002.
- [7] Web oficial Ath9k – Linux Wireless: <http://wireless.kernel.org/en/users/Drivers/ath9>