

Evaluación de la Fiabilidad *end-to-end* en Redes Inalámbricas Industriales *multi-hop* con Nodos Móviles

Sergio Montero, Javier Gozalvez

smontero@umh.es, j.gozalvez@umh.es

UWICORE, Ubiquitous Wireless Communications Research Laboratory, www.uwicare.umh.es
Universidad Miguel Hernández de Elche. Avda. de la Universidad s/n, 03202, Elche, España.

Abstract- Wireless industrial communications are expected to represent an essential component of the Factories of the Future in order to facilitate the real-time connectivity of mobile sensors within the factory. However, current industrial wireless standards have been designed for networks with fixed devices and its performance is highly sensitive to the mobility of certain devices. To analyse this sensitive when mobility is considered, this paper assesses the end-to-end data reliability of a mobile device when it is within a wireless industrial network. The evaluation done pays special attention to two different general methods for establishing the end-to-end route. In addition, this paper also evaluates by simulation different periods of time with which the network manager establishes and schedules new routes into network's devices when the shadow characteristics of the industrial radio channel are considered.

I. INTRODUCCIÓN

En las redes de comunicaciones inalámbricas industriales, a diferencia de otros sistemas inalámbricos como el celular, el gestor/coordinador de la red puede no disponer de una comunicación directa con todos los dispositivos de la red. Por este motivo, y con el objetivo de proporcionar elevados niveles de fiabilidad, WirelessHART [1] e ISA100.11a [2], los dos estándares de comunicaciones industriales más importantes, emplean un sistema de acceso al medio TSMP (*Time Synchronized Mesh Protocol*) [3] que divide el tiempo en *slots* y emplea saltos de canal. Ambos estándares emplean una topología de red *mesh* en la que los distintos dispositivos de la red, que utilizan transceptores radio compatibles con el estándar IEEE 802.15.4 [4], pueden ser empleados como dispositivos retransmisores de paquetes enviados por otros dispositivos de la red. La gestión de la red, es decir, la gestión de las rutas, los *slots* y los canales de frecuencia, se realiza de forma centralizada a través de un dispositivo coordinador denominado *System Manager* por ISA100.11a y *Network Manager* por WirelessHART. Para gestionar la red de forma adecuada, todos los dispositivos desplegados reportan periódicamente información al coordinador. El coordinador, en base a la información recibida, realiza los cambios oportunos para que la red cumpla con los requisitos de QoS (*Quality of Service*) establecidos con anterioridad en términos de fiabilidad y retardo. En ausencia de dispositivos móviles, los cambios sufridos por la red son mínimos, por lo que los lentos pero fiables procesos empleados por ambos estándares para efectuar los cambios en la red resultan adecuados. En este contexto, la futura incorporación de dispositivos móviles dificultará esta gestión, necesitando de

mecanismos que permitan una adaptación más rápida a los cambios de la red, a la vez que continúen siendo mecanismos fiables.

En los últimos años se han realizado diversas investigaciones que estudian las redes inalámbricas industriales con el objetivo de cumplir con los requisitos de QoS. Así, por ejemplo, en [5] se ha estudiado el establecimiento de rutas con el objetivo de reducir el retardo *end-to-end* de las comunicaciones industriales inalámbricas cuando se consideran transmisiones sin errores entre dispositivos estáticos. Otro ejemplo es la investigación realizada en [6], investigación que ha estudiado la capacidad de acomodar tráfico periódico en una red inalámbrica industrial cuando los dispositivos están dispuestos en una topología en estrella. Los anteriores estudios no consideran dispositivos móviles, lo cual será un aspecto clave en las comunicaciones inalámbricas industriales del futuro. Sin embargo, para el despliegue real de dispositivos móviles, la red ha de ser capaz de proporcionar adecuados niveles de fiabilidad y retardo también a estos sensores inalámbricos. En [7] ya se estudió el impacto que la movilidad produce en las redes inalámbricas industriales desde el punto de vista del *Throughput* cuando no se consideran errores de propagación. En la literatura también se han propuesto mecanismos para reducir el impacto que la movilidad de ciertos dispositivos produce en redes inalámbricas industriales. Así, en [8] se ha propuesto modificar el mecanismo de descubrimiento de vecinos con el objetivo de incrementar la probabilidad de descubrir dispositivos vecinos en un tiempo acotado e informar de ello al coordinador, mientras que en [9] se ha optado por proponer un mecanismo de estimación de posición y utilizar esta información para realizar procesos de *handover*. Los anteriores trabajos sin embargo no estudian la fiabilidad *end-to-end* de la comunicación entre un dispositivo móvil y otro fijo que se encuentra a más de un salto.

En este contexto, el presente artículo evalúa, mediante simulación, la fiabilidad *end-to-end* de la comunicación entre un dispositivo móvil y un dispositivo fijo que actúa como *Gateway (GW)* cuando se supone un modelo de canal radio basado en diferentes entornos industriales. Tal y como se verá en el apartado de resultados, la fiabilidad *end-to-end* de la comunicación entre el dispositivo móvil y el *GW* se ve reducida en un factor que depende de aspectos como la velocidad del dispositivo móvil, la separación entre los dispositivos fijos desplegados o el entorno industrial considerado, entre otros.

II. FIABILIDAD EN REDES INALÁMBRICAS INDUSTRIALES

Las redes inalámbricas con topología de red *mesh* son empleadas para extender la cobertura de la red a través de transmisiones *multi-hop*. No obstante, es necesario determinar y programar las rutas y los *slots* que permitan una comunicación fiable de los distintos flujos de datos. En este contexto, se define la fiabilidad *end-to-end* como la probabilidad de que un paquete originado por un nodo fuente sea recibido correctamente por el nodo destino, cuando se emplean las rutas y los *slots* establecidos de forma periódica por el coordinador de la red. Tanto WirelessHART como ISA100.11a especifican ciertas normas de cómo se han de determinar y programar las rutas y los *slots* empleados en las comunicaciones, si bien dejan cierta libertad en su implementación. El coordinador de la red ha de programar los *slots* comenzando por las transmisiones correspondientes a los flujos de datos con menor periodicidad, siendo asignados en orden desde el nodo fuente hasta el nodo destino. Para obtener comunicaciones con un alto nivel de fiabilidad, propio de las comunicaciones industriales, a cada flujo de datos periódico le han de ser asignados al menos dos *slots* dedicados por cada salto de la ruta principal y un *slot* por cada salto de una ruta secundaria, si existiese.

Para cumplir en todo instante con los requisitos de QoS, cuando se considera la movilidad de ciertos dispositivos, es necesario realizar reprogramaciones de las comunicaciones y las rutas de los dispositivos móviles de forma más frecuente. La cadencia con la que el gestor de la red determina y programa una nueva ruta y asigna los nuevos *slots*, definida como T_R , depende del procedimiento empleado para realizar estas modificaciones, procedimiento no estrictamente definido en los estándares. Los estándares sí especifican el uso de una supertrama de gestión, donde son asignados los *slots* empleados para funciones de gestión de la red, así como su periodicidad (T_N). En el caso del estándar WirelessHART, que en su última versión hecha pública todavía no considera la movilidad de dispositivos sensores, se establece que T_N ha de ser de 64 segundos. T_N y T_R están relacionados de forma que una reducción de T_N se traduce en una reducción de T_R . Es importante mencionar que los recursos (*slots*) dedicados a funciones de gestión han de estar contenidos en la supertrama de gestión y han de ser asignados previamente a su uso, por lo que una reducción de T_N implicará un incremento de los *slots* dedicados a funciones de gestión, independientemente de que éstos sean o no utilizados.

III. ESCENARIO DE EVALUACIÓN

En esta sección se presenta el escenario bajo el que se ha realizado la evaluación de la fiabilidad *end-to-end* de la comunicación entre un dispositivo móvil y el *Gateway* en una red inalámbrica industrial. En concreto se presenta el modelo de propagación radio, el modelo de movilidad y el despliegue de dispositivos empleados en las distintas simulaciones realizadas.

A. Modelo de Canal Radio

El modelo de canal radio empleado es el modelo *log-distance path loss* con *log-normal shadowing*, también conocido como modelo *log-normal path loss* [10]. De acuerdo a este modelo, las pérdidas por propagación a una determinada distancia d vienen definidas por:

$$PL(d) = PL(d_0) + 10 \cdot n \cdot \log(d/d_0) + X_\sigma \quad (1)$$

donde $PL(d_0)$ representa las pérdidas por propagación a una distancia de referencia d_0 , n representa el exponente de las pérdidas de propagación y X_σ representa una variable aleatoria con distribución normal que modela el efecto *shadowing*. El modelo de propagación radio empleado hace uso de los valores de $PL(d_0)$, n y σ presentados en la Tabla 1, obtenidos por los autores de [11] a partir de medidas de *path-loss* para 3 entornos industriales a 2400 MHz. Los 3 entornos industriales considerados en [11] son: visión directa (*LOS*, *Line-Of-Sight*) y visión obstruida (*OBS*, *Obstructed line-of-Sight*) levemente (*light*) y fuertemente (*heavy*), presentándose también valores de $PL(d_0)$, n y σ al considerar los 3 entornos industriales de forma conjunta (*All topographies*).

A partir de un determinado valor de potencia de transmisión (P_{Tx}) y considerando las pérdidas del trayecto, $PL(d)$, es posible estimar en (2) el nivel de potencia de señal recibida RSS (*Received Signal Strength*) a una determinada distancia d . Con este nivel de potencia de señal recibida y considerando una determinada potencia de ruido N puede ser estimado en (3) el SNR (*Signal-to-Noise Ratio*) de una determinada transmisión. Al emplear un transceptor radio compatible con el estándar IEEE 802.15.4 [4] es posible obtener en (4) el BER (*Bit Error Rate*) a partir del SNR. Finalmente, con este BER es posible estimar en (5) el PER (*Packet Error Ratio*) de un paquete de L bytes. En la Fig. 1 se presenta, a modo de ejemplo, el PER obtenido en función de la distancia entre el transmisor y el receptor cuando se transmite un paquete de 133 bytes con una potencia de transmisión de 3 dBm para cada entorno considerado en la Tabla 1 en presencia de una potencia de ruido de $N = -90$ dBm.

	$PL(d_0)$ [dB]	n [-]	σ [dB]
<i>LOS</i>	67.43	1.72	4.73
<i>OBS light</i>	72.71	1.52	4.61
<i>OBS heavy</i>	80.48	1.69	6.62
<i>All topographies</i>	71.84	2.16	8.13

Tabla 1. Coeficientes del modelo *log-normal path-loss* ($d_0=15$ m) [11].

$$RSS(d) = P_{Tx} - PL(d) \quad (2)$$

$$SNR(d) = RSS(d) - N \quad (3)$$

$$BER(d) = \frac{8}{15} \times \frac{1}{16} \times \sum_{k=2}^{16} (-1)^k \binom{16}{k} e^{\left(20 \times SNR(d) \times \left(\frac{1}{k} - 1\right)\right)} \quad (4)$$

$$PER(d) = (1 - BER(d))^{(8 \cdot L)} \quad (5)$$

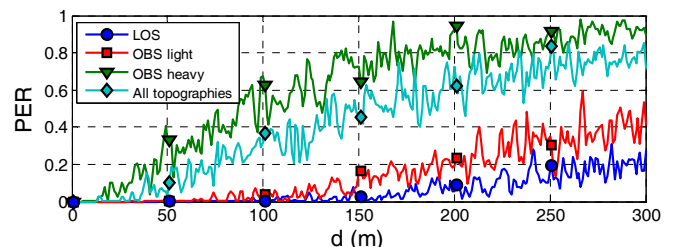


Fig. 1. PER en función de la distancia entre el emisor y el receptor para los 4 entornos de la Tabla 1 cuando $P_{Tx}=3$ dBm, $N=-90$ dBm y $L=133$ bytes.

B. Modelo de Movilidad

El modelo de movilidad empleado es el modelo *Random Waypoint* (RWP), modelo sintético comúnmente usado para describir el patrón de movimiento de dispositivos. En este modelo cada dispositivo se desplaza en línea recta desde una

posición P_i hasta una posición P_{i+1} . Las posiciones P_{i+1} son escogidas aleatoriamente con igual probabilidad dentro del conjunto de posiciones que conforman el área por el cual se puede desplazar el dispositivo móvil. Este estudio ha considerado la velocidad de desplazamiento del dispositivo móvil constante para cada prueba realizada, evaluando, tal y como se verá en el apartado de resultados, velocidades de desplazamiento del dispositivo móvil entre 0.5m/s y 5m/s.

C. Despliegue de Dispositivos

El escenario considerado está formado por 8 dispositivos fijos desplegados según se presenta en la Fig. 2 y un dispositivo móvil adicional que se asume que emplea un modelo de movilidad RWP. El dispositivo móvil se desplaza dentro de un área cuadrada de $3d$ de lado (en gris en la Fig. 2), siendo d una variable que representa la separación entre dos dispositivos fijos vecinos. El dispositivo identificado con GW, no sólo actúa como *Gateway* de las comunicaciones, incluidas las del dispositivo móvil, sino que también incorpora las funciones de coordinador de la red.

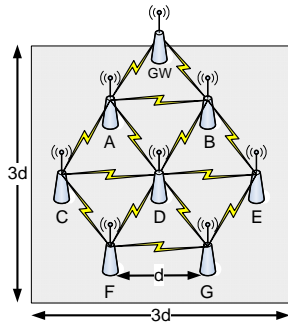


Fig. 2. Despliegue de dispositivos fijos y área de desplazamiento del dispositivo móvil.

IV. EVALUACIÓN

La evaluación realizada se centra en estudiar la variación de la cadencia con la que el coordinador de la red determina y programa una nueva ruta, así como en observar cómo afecta esta variación a la fiabilidad *end-to-end* de un dispositivo sensor móvil cuando se considera el modelo de canal radio detallado en el apartado III.A. La evaluación realizada considera el despliegue de la Fig. 2 cuando se incorpora un dispositivo móvil adicional que se desplaza a diferentes velocidades constantes empleando el modelo de movilidad RWP, así como el envío de paquetes de datos al *Gateway* con una periodicidad (T_D) de un segundo.

A. Técnicas de Enrutamiento *end-to-end*

Cuatro técnicas para determinar las rutas *end-to-end* en presencia de dispositivos móviles han sido consideradas y evaluadas: *Ruta₂₊₁*, *Ruta₂₊₀*, *Salto₂₊₁* y *Salto₂₊₀*. En las dos técnicas identificadas como *Ruta* el coordinador de la red evalúa la fiabilidad de todas las posibles rutas *end-to-end* y escoge aquellas que obtienen la máxima fiabilidad. En cambio, en las dos técnicas identificadas como *Salto* el coordinador sólo tienen en cuenta la fiabilidad del primer salto, es decir el salto entre el dispositivo móvil y cada uno de los dispositivos fijos. El subíndice de la técnica indica el número de *slots* empleados por cada salto en la ruta principal y la ruta secundaria. Así, las técnicas *Ruta₂₊₁* y *Salto₂₊₁* dedican dos *slots* por cada salto de la ruta principal y un *slot* por cada salto de la secundaria, mientras que las técnicas *Ruta₂₊₀* y *Salto₂₊₀* sólo dedican los dos *slots* de la principal.

B. Resultados

En primer lugar se presentan, en la Fig. 3, los resultados correspondientes a un fragmento de una de las simulaciones realizadas para la evaluación de la fiabilidad *end-to-end* entre el dispositivo sensor móvil y el *Gateway*. En concreto el fragmento se corresponde a la evaluación de la técnica *Ruta₂₊₁* cuando se considera un entorno *LOS* entre los dispositivos fijos y un entorno *All topographies* entre el dispositivo móvil y los dispositivos fijos, $v=3\text{m/s}$, $d=150\text{m}$ y $L=133\text{ bytes}$. La Fig. 3a muestra la evolución temporal del dispositivo al que el dispositivo móvil se conecta en el primer salto de la ruta principal, mientras que la Fig. 3b muestra la evolución temporal de la fiabilidad *end-to-end*, particularizando para el caso de considerar $T_R=1\text{ s}$ y $T_R=64\text{ s}$. Los resultados obtenidos muestran que reconfigurar las rutas y *slots* cada segundo ($T_R=1\text{ s}$) incrementa la fiabilidad con respecto a reconfigurar las rutas cada 64 segundos ($T_R=64\text{ s}$). Estos resultados son consecuencia de que emplear un T_R más alto implica un mayor tiempo que ha de transcurrir hasta poder modificar de nuevo las rutas y *slots*, cambios que pueden observarse en la variación del dispositivo asignado como primer salto de la Fig. 3a. Este mayor tiempo transcurrido hasta modificar de nuevo las rutas y *slots* supone un mayor cambio en las condiciones de propagación que se traduce en una disminución de la fiabilidad (ver Fig. 3b).

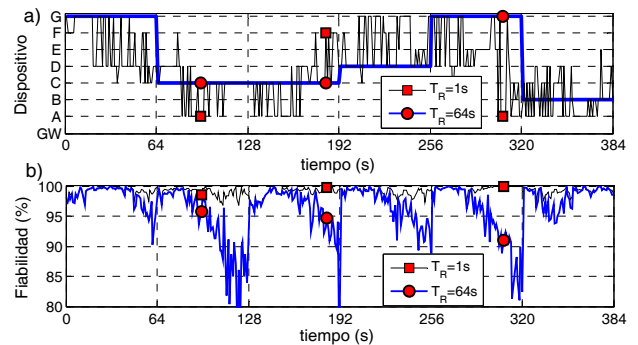


Fig. 3. Evolución temporal del dispositivo al que el dispositivo móvil se conecta en el primer salto (a) y evolución temporal de la fiabilidad *end-to-end* (b) al considerar $T_R=1\text{ s}$ y $T_R=64\text{ s}$ con $v=3\text{ m/s}$, $L=133\text{ bytes}$ y $d=150\text{m}$.

Los resultados presentados en la Fig. 4 se corresponden a la evaluación de las diferentes técnicas de enrutamiento cuando se considera un entorno *LOS* entre todos los dispositivos, $v=3\text{m/s}$ y $T_R=1\text{ s}$. En la Fig. 4a se presenta la fiabilidad *end-to-end* de las 4 técnicas en función de L (tamaño del paquete de datos enviado) cuando $d=100\text{m}$, mientras que en la Fig. 4b se presentan sólo las técnicas que incluyen la ruta secundaria en función de d cuando $L=26\text{ bytes}$. Por un lado, los resultados obtenidos muestran un aumento de la fiabilidad *end-to-end* cuando se añade la ruta secundaria (*Ruta₂₊₁* y *Salto₂₊₁*). Por otro lado, la fiabilidad *end-to-end* es mayor cuando se determina la ruta en base a la fiabilidad de la ruta completa (*Ruta₂₊₁* y *Ruta₂₊₀*) con respecto a determinarla en base a la fiabilidad del primer salto (*Salto₂₊₁* y *Salto₂₊₀*). Como es lógico, un incremento de L o de d supone una reducción de la fiabilidad *end-to-end*, si bien la fiabilidad resultante depende del entorno evaluado.

Los resultados mostrados en la Fig. 5 se corresponden a la fiabilidad *end-to-end* en función de la velocidad del dispositivo móvil cuando se evalúan las técnicas *Ruta₂₊₁* y *Ruta₂₊₀* para diferentes valores de T_R al considerar un entorno *LOS* entre todas las comunicaciones, $L=26\text{ bytes}$ y $d=150\text{m}$. Los resultados obtenidos muestran una reducción de la

fiabilidad *end-to-end* al aumentar v para valores de T_R superiores a T_D , esto es, superior a 1 segundo, pues al aumentar la velocidad más rápido cambia el nivel de señal recibido. Es importante destacar que el hecho de considerar una ruta secundaria además de la ruta principal (*Ruta₂₊₁*), no sólo aumenta la fiabilidad con respecto a no considerarla, sino que además reduce la diferencia de fiabilidad *end-to-end* al comparar un determinado valor de T_R con respecto a $T_R=1s$. Así, por ejemplo, la fiabilidad de la técnica *Ruta₂₊₁* se reduce aproximadamente el 0.01% para $v=4m/s$ al emplear $T_R=32s$ con respecto a emplear $T_R=1s$, mientras que para la técnica *Ruta₂₊₀*, dicha reducción se incrementa hasta el 0.1%, destacándose así la importancia de emplear rutas secundarias en las redes industriales cuando también se consideran dispositivos móviles. Los resultados de la Fig. 6, que también muestra la fiabilidad en función de la velocidad del dispositivo móvil para la técnica *Ruta₂₊₁*, muestran tendencias similares cuando se considera un entorno *All topographies* entre el dispositivo móvil y los dispositivos fijos y un entorno *LOS* o *All topographies* entre los dispositivos fijos. Como es de esperar, considerar un entorno *All topographies* entre los fijos reduce la fiabilidad *end-to-end* con respecto a considerar un entorno *LOS*. Así, los resultados obtenidos mediante las simulaciones realizadas indican que la fiabilidad *end-to-end* se reduce con la movilidad del dispositivo en un factor que depende de aspectos como la velocidad del dispositivo, la separación entre los dispositivos o el entorno considerado, entre otros.

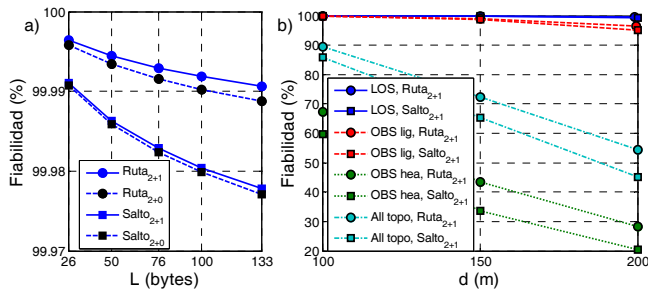


Fig. 4. Fiabilidad *end-to-end* de las diferentes técnicas en función de L para el entorno *LOS* cuando $d=100m$ (a) y en función de d para los 4 entornos de la Tabla 1 cuando $L=26 bytes$ (b) al considerar $v=3 m/s$ y $T_R=1s$.

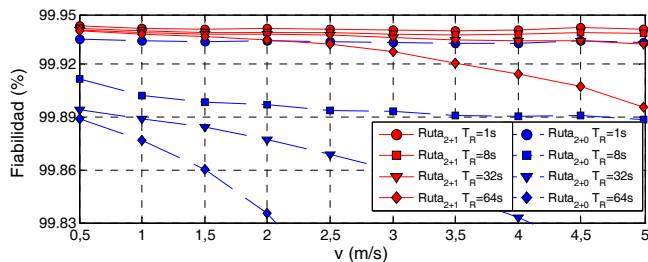


Fig. 5. Fiabilidad *end-to-end* de las técnicas *Ruta₂₊₁* y *Ruta₂₊₀* en función de v para distintos valores de T_R en un entorno *LOS* con $d=150m$ y $L=26 bytes$.

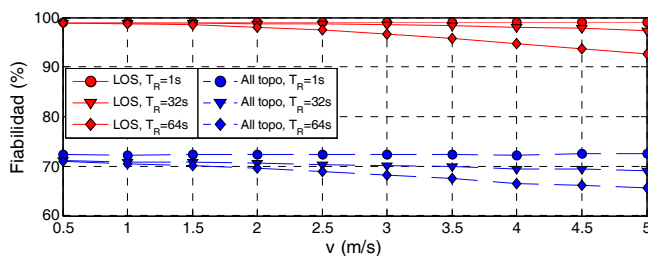


Fig. 6. Fiabilidad *end-to-end* de la técnica *Ruta₂₊₁* en función de v para distintos valores de T_R y de entornos cuando $d=150m$ y $L=26 bytes$.

V. CONCLUSIONES

El presente artículo ha abordado un aspecto clave y novedoso de las comunicaciones inalámbricas industriales del futuro como es la incorporación de dispositivos sensores móviles a este tipo de redes industriales. El problema ha sido abordado desde la perspectiva del análisis de la fiabilidad *end-to-end*. En concreto, el análisis realizado ha evaluado la fiabilidad *end-to-end* de las transmisiones entre un dispositivo móvil, que se desplaza siguiendo un modelo de movilidad RWP, y el *Gateway* que permanece fijo.

Tal y como se ha demostrado resulta posible alcanzar niveles de fiabilidad superiores al 99.99% en entornos industriales con movilidad. Sin embargo, también se ha demostrado que el empleo de tiempos de reconfiguración mayores a la periodicidad del envío de datos resulta en una reducción de la fiabilidad *end-to-end* al no poder modificar la ruta hasta el siguiente periodo de reconfiguración. El estudio ha puesto de manifiesto que la reducción de la fiabilidad *end-to-end* depende de factores como la velocidad del dispositivo, la separación entre dispositivos, la técnica de enrutamiento o el entorno industrial considerado, entre otros.

Finalmente destacar que resultaría interesante centrar futuros esfuerzos en investigar y desarrollar técnicas de programación de rutas y *slots* que reduzcan el tiempo empleado en la reconfiguración de las rutas o técnicas que opten por emplear rutas, que aunque no sean optimas en el instante en que se determinen, sí obtengan una mayor fiabilidad durante el movimiento del dispositivo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la Generalitat Valenciana mediante una beca VALi+d (ACIF/2013/060).

REFERENCIAS

- [1] IEC 62591 Ed. 1.0: Industrial communication networks –Wireless communication network and communication profiles– WirelessHART, *International Electrotechnical Commission, IEC*, 2010.
- [2] *Wireless systems for industrial automation: Process control and related applications*. ISA100.11a Working Group, 2009.
- [3] K. Pister and L. Doherty, "TSMP: time synchronized mesh protocol", *Proc. of the 20th International Symposium on Parallel and Distributed Computing and Systems (PDCS'08)*, Nov. 2008, USA.
- [4] *IEEE 802.15.4 Standard: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)*, 2006, pp. 1-323.
- [5] Y. Chung, et al, "Time slot schedule based minimum delay graph in TDMA supported wireless industrial system", *Proc. of the International Conference on Computer Information Systems and Industrial Management Applications (CISIM'10)*, Oct. 2010, Poland.
- [6] F. Dewanta, et al, "Message scheduling approach on dedicated time slot of ISA100.11a", *Proc. of the 3rd International Conference on ICT Convergence (ICTC'12)*, Oct. 2012, Korea.
- [7] S. Montero, et al, "Impact of mobility on the management and performance of WirelessHART industrial communications", *Proc. of the 17th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA'12)*, Sep. 2012, Poland.
- [8] S. Montero and J. Gozalvez, "LAN-ND, a New Neighbour Discovery Protocol for Mobile WirelessHART Industrial Networks," *Proc. of the 18th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA'13)*, Sep. 2013, Italy.
- [9] X. Zhu, et al, "RoamingHART: A Collaborative Localization System on WirelessHART", *Proc. of the 18th IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium (RTAS'12)*, Apr. 2012, China.
- [10] T. S. Rappaport. *Wireless Communications: Principles & Practices*. Prentice Hall, 1996.
- [11] 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, Jul. 2008.