

Efecto de la Movilidad en Redes Inalámbricas de Comunicaciones Industriales

Sergio Montero⁽¹⁾, Javier Gozalvez⁽¹⁾, Miguel Sepulcre⁽¹⁾, Gonzalo Prieto⁽²⁾

smontero@umh.es, j.gozalvez@umh.es, msepulcre@umh.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- In the Factories of the Future, wireless communication technologies represent an essential component to facilitate the real-time monitoring and control the working environment and workers' health and psychological conditions. In particular, wireless sensor networks offer a great potential due to their flexibility and low cost for mobile sensing applications. However, the adverse propagation conditions and the requirements of industrial applications impose significant challenges for the deployment of wireless sensor networks in factories. This is specially true when considering networks with mobile nodes given that their connectivity needs to be guaranteed. In this context, this paper analyzes the effect produced by mobility in industrial wireless communications in different scenarios and operating conditions.

I. INTRODUCCIÓN

En el nuevo marco Europeo de Fábrica del Futuro, el trabajador representa un importante activo para la mejora de la productividad y la competitividad, por lo que la reducción de sus riesgos respecto a su salud y su seguridad cobra relevancia. Con el objetivo de monitorizar en todo momento el entorno de trabajo y las condiciones del trabajador, el proyecto FASyS (Fábrica Absolutamente Segura y Saludable) [1] está desarrollando un sistema de comunicaciones inalámbricas heterogéneas, el cual tiene como una de sus tecnologías fundamentales las redes de sensores inalámbricas (WSN, *Wireless Sensor Networks*) por su flexibilidad y bajo coste. El despliegue de sensores inalámbricos permite la continua extracción de datos para posibilita la toma de decisiones desde un centro de control ante la detección de posibles riesgos. En este contexto, en un entorno de propagación adverso como el industrial, caracterizado por múltiples elementos obstructores, la red WSN debe proporcionar adecuados niveles de calidad de servicio que permitan una fiable comunicación. Este aspecto es aún más relevante si se considera que algunos nodos de la red pueden tener movilidad, como pueden ser los nodos asociados a trabajadores o a la maquinaria móvil, puesto que este tipo de redes no fueron inicialmente diseñadas para soportar movilidad. De hecho, el estándar de comunicaciones inalámbricas industriales WirelessHART [2] ha sido específicamente desarrollado para trabajar en entornos hostiles, al proporcionar altos niveles de fiabilidad y robustez, pero no para operar de forma adecuada con movilidad. La movilidad es un área de investigación destacada en el ámbito de las comunicaciones inalámbricas industriales debido a las variaciones que introduce en el canal radio y al empleo de una gestión realizada por un nodo central o coordinador, que requiere que todo nodo (móvil o fijo) tenga continua comunicación con él [3]. Trabajos como

[4] han evaluado experimentalmente el impacto de las condiciones de propagación en entornos industriales con nodos sensoriales inalámbricos móviles. Otros trabajos como [5] y [6] han abordado ya el diseño de nuevos protocolos de comunicación para mejorar la conectividad en redes industriales inalámbricas con nodos móviles. En este contexto, este trabajo presenta un análisis de los efectos adversos que la movilidad introduce en redes inalámbricas de comunicaciones industriales, basándose en el estudio detallado de varios de los mecanismos de comunicación y gestión empleados por WirelessHART para proporcionar y mantener la conectividad de los nodos de la red. Para ello, se han diseñado diversas métricas que permiten evaluar el efecto introducido por la movilidad en diversos escenarios.

II. ESTÁNDAR WIRELESSHART

El estándar de comunicaciones industriales inalámbricas WirelessHART se basa en el protocolo IEEE 802.15.4 operando en la banda de 2.4GHz, sobre el que añade el mecanismo de acceso al medio TDMA para mejorar su robustez. Con TDMA, el tiempo se divide en intervalos temporales denominados *slots*, con una duración fija de $t_s=10\text{ms}$. Los *slots* se organizan en estructuras denominadas supertramas (*Superframe*) que se repiten periódicamente cada $N=6400$ *slots*. Cada supertrama tiene, por tanto, una duración de $T_N=N \cdot t_s=64\text{s}$, y contiene *slots* para la transmisión de datos y *slots* para la gestión de la red. El gestor de la red (NM, *Network Manager*), de forma centralizada, se encarga de asignar los *slots* de comunicación y gestión a los nuevos nodos que soliciten acceso a la red, o de reprogramar *slots* ya asignados cuando dos nodos que pertenecen a la red se detectan mutuamente por primera vez. Estos dos procesos pueden causar un alto impacto en la movilidad y se describen con más detalle a continuación.

El proceso empleado para que un nodo obtenga el acceso a la red se resume en la Fig. 1. En primer lugar, el nodo que requiere acceder a la red ha de estar en modo recepción hasta recibir un mensaje de *Anuncio* de un nodo ya perteneciente a la red. En este tipo de mensajes de gestión se transmite información sobre cómo y en qué *slot* se ha de solicitar el acceso a la red. Una vez recibida esta información, el nodo que requiere acceder a la red envía un mensaje de *Petición de acceso* en el *slot* indicado en el *Anuncio*. El nodo que recibe esta petición, reenvía dicho mensaje al siguiente nodo en la ruta hasta el NM (dicha ruta deberá estar previamente establecida por el NM). Cuando el NM recibe la petición, incluye al nuevo nodo en la asignación de *slots*, realizando una nueva planificación. Esta asignación no solo implica la

asignación de *slots* para datos y gestión al nuevo nodo, sino que puede implicar también la asignación o reasignación de *slots* a otros nodos para establecer nuevas rutas de comunicación de datos y gestión. Por ello, una vez calculada la nueva planificación en base al estado de la red, el NM la envía a los nodos implicados en los cambios.

WirelessHART dispone también de un mecanismo para la detección de nodos vecinos, es decir, para la detección de nodos con los que puede establecerse una comunicación directa sin emplear nodos intermedios. Este mecanismo se basa en el empleo de un *slot* de descubrimiento común a todos los nodos, denominado *slot* de *Detección*. Cada nodo perteneciente a la red, escoge entre transmitir o recibir un mensaje de prueba de conectividad en dicho *slot* de forma aleatoria con una cierta probabilidad. Cuando un nodo recibe un mensaje en este *slot* procedente de otro nodo que no tenía considerado como vecino, lo almacena en su tabla de vecinos e informa de ello al coordinador para que lo tenga en cuenta en la planificación de la red. Este proceso de descubrimiento probabilístico, puede conllevar tiempos elevados de detección de nuevos nodos, aspecto que puede ser crítico especialmente en escenarios con movilidad.

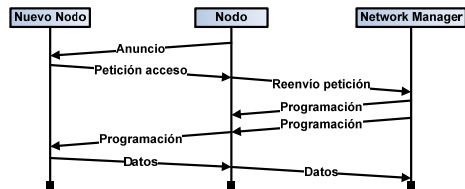


Fig. 1. Secuencia de mensajes intercambiados para el acceso de un nuevo nodo a la red.

Para realizar los procesos de gestión descritos, los principales tipos de *slots* de gestión definidos son:

- *Detección*: *slot* común para detectar nuevos vecinos.
- *Anuncio*: *slots* dedicados para la difusión de información para el acceso de nuevos nodos.
- *Petición de acceso*: *slots* dedicados para el envío de una petición de acceso por parte de un nodo que haya recibido un *Anuncio*.
- *Gestión UL*: *slots* empleados para informar de la detección y la caída de vecinos, y para el reenvío al NM de las peticiones de acceso.
- *Gestión DL*: *slots* empleados para el envío de la asignación de *slots* y la gestión a los nodos de la red.

III. MÉTRICAS DE RENDIMIENTO

Para el análisis de la movilidad se han desarrollado diversas métricas que permiten evaluar el rendimiento de las comunicaciones con WirelessHART en entornos con movilidad. Estas métricas, válidas para escenarios con un único nodo móvil y un único canal de frecuencia, podrían extenderse a casos más complejos para que incluyeran un mayor número de escenarios. Para el desarrollo de estas métricas, que se particularizarán en escenarios concretos en los siguientes apartados, se requiere la definición de ciertos parámetros. Se define el número de *slots* que componen una supertrama como N , y su duración temporal como T_N , tal y como se había mencionado ya en la sección anterior. El número de *slots* dedicados a la gestión dentro de una supertrama se define como M , mientras que T_M representa el tiempo empleado por la gestión en una supertrama. El tiempo que un nodo móvil se encuentra bajo la cobertura de la red se

define como t_e , y depende del despliegue de nodos de la red, los rangos de cobertura, la trayectoria y velocidad del propio nodo móvil. El número de saltos o enlaces intermedios entre el nodo origen de los datos y el destino se define como N_h .

A. Tiempo de acceso

El tiempo de acceso de un nuevo nodo en la red (t_a) se define como el tiempo que transcurre desde que el nodo entra en la zona de cobertura de algún nodo perteneciente a la red y el instante en el que se le asignan uno o varios *slots* para la transmisión de datos y gestión. El tiempo de acceso está compuesto por la suma de dos tiempos, uno variable y otro fijo. Por un lado, el tiempo de espera que transcurre desde el instante en el que el nodo entra dentro del rango de cobertura de la red hasta el *slot* asignado a la transmisión del *Anuncio* es variable con una distribución de probabilidad uniforme entre cero (entra y se transmite el *Anuncio*) y $T_N - t_s$ (entra en el *slot* inmediatamente después a la transmisión del *Anuncio*). Por otro lado, el tiempo que transcurre desde que se recibe el *Anuncio* hasta que se asignan los *slots* de transmisión es fijo y aproximadamente igual al tiempo empleado por la gestión en una supertrama, T_M , para un escenario dado. En este contexto, el tiempo de acceso de un nuevo nodo a la red es una variable aleatoria con una distribución de probabilidad uniforme entre un tiempo de acceso mínimo ($t_a = T_M$) y un valor máximo ($t_a = T_M + T_N - t_s$). El valor medio del tiempo de acceso (\bar{t}_a), puede calcularse como:

$$\bar{t}_a = \frac{T_N + 2 \cdot T_M - t_s}{2} \quad (1)$$

B. Throughput normalizado

El *throughput* normalizado (Th) se define como la relación entre el número máximo de *slots* que el NM puede asignar a un determinado nodo para transmitir mensajes de datos, y el número total de *slots* disponibles. Se ha considerado esta métrica en lugar del *throughput* por ser independiente de factores como la tasa de transmisión y el tamaño de los mensajes. Para el cálculo del *throughput* normalizado, se ha de tener en cuenta el número de saltos o enlaces intermedios, N_h , al requerir N_h retransmisiones hasta el nodo destino. Por ello, si el número de *slots* disponibles para la transmisión de datos es $N - M$, el número máximo de *slots* que se pueden asignar al nodo para transmitir mensajes de datos es $(N - M)N_h$. Para el caso en el que un nodo se encuentre estático y conectado a la red la expresión que permite calcular el *throughput* normalizado es la siguiente:

$$Th = \frac{N - M}{N \cdot N_h} \quad (2)$$

Cuando un nodo se desplaza por la red es posible que pierda la cobertura con el nodo a través del cual se comunica con el resto de la red (nodo que recibió la *Petición de acceso* inicial). Para no perder dicha conectividad, el nodo en movilidad debe encontrar un nuevo nodo a través del cual poder mantener la comunicación con el resto de la red antes de perder dicha cobertura. Pueden diferenciarse, por tanto, dos casos. En el caso de que el nodo móvil pierda la cobertura antes de encontrar un nuevo nodo a través del cual comunicarse, el nodo móvil deberá iniciar un proceso de *reasociación* para solicitar de nuevo acceso a la red. Durante este proceso, el nodo móvil no dispondrá de *slots* asignados para la comunicación. Por ello, el proceso de reasociación producido por la movilidad del nodo afecta negativamente al *throughput* normalizado. La duración del proceso de

reasociación es igual al tiempo de acceso (t_a) anteriormente descrito. Considerando que la trayectoria de un nodo móvil puede provocar múltiples reasociaciones, la ecuación (3) expresa cómo el *throughput* normalizado se ve afectado por la movilidad. En esta ecuación, el *throughput* normalizado calculado para el escenario estático se ve multiplicado por un factor que relaciona el tiempo durante el cual el nodo tiene *slots* asignados para la comunicación $t_e - \sum t_a$ normalizado por t_e , tiempo total que transcurre bajo la cobertura de la red.

$$Th = \left(\frac{N-M}{N \cdot N_h} \right) \cdot \left(\frac{t_e - \sum t_a}{t_e} \right) \quad (3)$$

En el caso de que el nodo móvil encuentre un nuevo nodo a través del cual comunicarse antes de perder la cobertura con el nodo que le proporciona la conectividad, podrá realizar un traspaso y no será necesario volver a solicitar el acceso a la red. Para que esto ocurra, deberá detectarse al nuevo nodo y configurado las nuevas asignaciones de *slots* antes de perder la cobertura con el nodo a través del cual se mantiene la comunicación. En estos casos, el *throughput* normalizado no se ve alterado.

IV. ANÁLISIS

El análisis realizado se centra en la evaluación del efecto de la movilidad en el rendimiento de las comunicaciones. Para ello se proponen tres escenarios relativamente sencillos, pero que son suficientes para demostrar el impacto negativo que la movilidad puede producir en el sistema.

A. Escenarios

Los escenarios propuestos para la realización del análisis consideran un NM y dos nodos (A y B) que tienen conectividad entre ellos y con el NM. En este escenario, se asume que los *slots* de gestión son consecutivos dentro de la supertrama, y que se encuentran organizados siguiendo el orden de mensajes empleado en el proceso de acceso de un nuevo nodo a la red, ilustrado en la Fig. 1. La supertrama resultante es mostrada en la Fig. 2 e incluye los tipos de *slot* descritos anteriormente para la comunicación y gestión de los nodos fijos A y B.

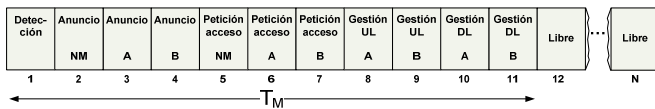


Fig. 2. Supertrama para un NM y dos nodos (A y B).

Nodo estático

En este escenario se considera un nodo estático adicional Z que solamente tiene conectividad con A, tal y como ilustra la Fig. 3. En este escenario, el número de *slots* de gestión necesarios es $M=17$, es decir, los 11 *slots* necesarios en ausencia del nodo Z (los que aparecen en la Fig. 2, antes de que el nodo Z acceda a la red), más los 6 *slots* necesarios para la comunicación y gestión de Z (uno para el anuncio y otro para la recepción de petición, más los 4 correspondientes a la gestión en ambos sentidos a dos saltos del NM).

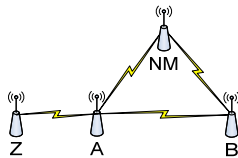


Fig. 3. Escenario estático.

Nodo móvil con reasociación

En este escenario se considera que el nodo Z entra a la red siguiendo una trayectoria rectilínea a una velocidad constante, de forma que solamente permanece un tiempo t_e bajo la cobertura de la red. El nodo Z accede inicialmente a través del nodo A. Antes de abandonar el rango de cobertura de A, el nodo Z está un determinado tiempo bajo cobertura simultánea de A y de B (t_{eAB}). En este escenario se asume que durante ese tiempo el nodo Z no es capaz de detectar a B, por lo que cuando Z pierde la cobertura de A se produce una *reasociación* a través de B. En la Fig. 4 se muestra la trayectoria seguida por Z, así como los dos periodos de duración t_a durante los cuales no transmite datos por estar solicitando acceso a la red (identificados con líneas oblicuas).

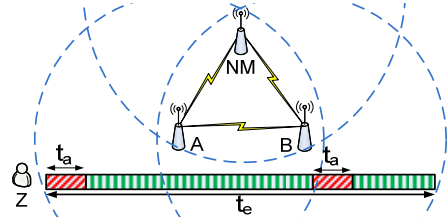


Fig. 4. Escenario con nodo móvil con reasociación.

Nodo móvil con traspaso

En el tercer y último escenario, se asume que durante t_{eAB} el nodo Z es capaz de detectar a B y que el NM tiene tiempo suficiente para configurar los *slots*, produciéndose así un *traspaso*. En este escenario sólo se produce un acceso a la red que sucede en el instante en que el nodo Z entra en el rango de cobertura de A.

B. Resultados

Para el análisis del efecto de la movilidad bajo las condiciones del estándar WirelessHART se han evaluado las métricas anteriormente definidas en los tres escenarios descritos. Para ello, se ha emulado de forma aleatoria el instante en el que el nodo móvil entra en la zona de cobertura del nodo A, puesto que el tiempo que tarda Z en acceder a la red depende en gran medida de la diferencia entre dicho instante y la aparición del *slot* de *Anuncio* en la supertrama.

En la Fig. 5, se representa el Th de los tres escenarios propuestos frente al tiempo de permanencia bajo la red t_e . Como se desprende de la ecuación (2), el Th en el escenario estático es constante e independiente de t_e , ya que se asume que el nodo estático ya ha accedido a la red. En cambio en los escenarios de *traspaso* y *reasociación*, sí que existe una dependencia de Th con t_e . En particular, el Th aumenta con t_e desde valores reducidos en valores bajos de t_e , hasta valores máximos en torno al Th obtenido en el escenario estático.

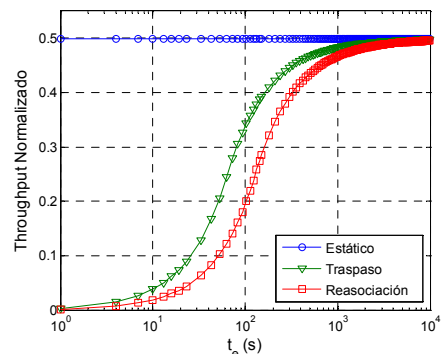


Fig. 5. Throughput normalizado para los 3 escenarios en función de t_e , considerando $N=6400$ slots y $M=17$.

El tiempo de permanencia bajo la red, t_e , depende del rango de cobertura y la velocidad de desplazamiento del propio nodo. La Tabla 1 muestra el *throughput* normalizado para los escenarios de reasociación (Th_{Reaso}) y traspaso (Th_{Tras}), considerando la trayectoria de la Fig. 4 y valores realistas para los rangos de cobertura y velocidad. En particular, la Tabla 1 considera dos rangos de cobertura, $R=200m$, correspondiente a condiciones de propagación con visión directa, y $R=30m$, correspondiente a propagación con obstáculos, y velocidades de $V=1m/s$ y $V=3m/s$ típicas de una persona andando y una carretilla en movimiento, respectivamente. Teniendo en cuenta que en el escenario estático el *throughput* normalizado es $Th=0.498$, esta tabla ilustra el efecto negativo que introduce la movilidad.

V (m/s)	R (m)	Th_{Reaso}	Th_{Tras}
1	200	0,446	0,472
3	200	0,339	0,419
1	30	0,174	0,321
3	30	0,058	0,116

Tabla 1. Throughput normalizado calculado en reasociación y traspaso.

La duración de la supertrama, fijada por WirelessHART a $T_N=64s$, puede tener un notable impacto en el rendimiento del sistema en escenarios con movilidad. En la Fig. 6, se muestra el Th obtenido mediante simulación para diferentes valores de T_N , considerando el escenario con reasociación. En condiciones de baja movilidad (t_e elevados), cuanto mayor es la duración de la supertrama, mayor es el *throughput* normalizado porque hay menos *slots* dedicados a la gestión de la red. Por otro lado, en condiciones de alta movilidad (t_e reducidos), cuanto menor es la duración de la supertrama, antes se puede producir el acceso y mayor *throughput* normalizado se obtiene al iniciar la transmisión más rápidamente. Es importante destacar que para valores de t_e intermedios, que posiblemente representen los escenarios más realistas, cada tiempo de permanencia bajo la cobertura de la red tiene una duración de la supertrama que maximiza el *throughput* normalizado. Estos resultados muestran los posibles beneficios de la adaptación dinámica de la duración de la supertrama. Contar con una duración fijada de antemano, optimiza el sistema sólo para un pequeño rango de t_e . La variación de dicha duración en función de las condiciones de movilidad podría permitir la optimización del *throughput* normalizado en un mayor conjunto de escenarios.

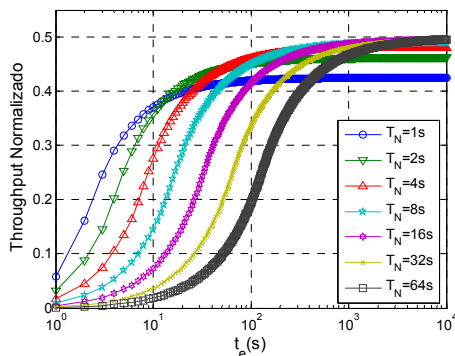


Fig. 6. Throughput normalizado para el escenario con reasociación en función de t_e , variando T_N y considerando $M=17$.

Los resultados sobre *throughput* normalizado en el escenario con traspaso se analizan en función de T_N en la Fig. 7 para cada uno de los cuatro casos representados en la Tabla 1. Como puede observarse, en cada caso se obtiene un

valor distinto de T_N que maximiza Th , siendo todos ellos valores mucho menores al recomendado por WirelessHART ($T_N=64$ segundos). Por otro lado, cabe destacar que al aumentar t_e , aumenta el valor de T_N que maximiza el Th . Además, cuanto menor es t_e , mayor es la diferencia entre el Th óptimo y el obtenido cuando $T_N=64$ segundos. Estos resultados indican que ciertos parámetros de operación de WirelessHART como T_N no se encuentran optimizados para los escenarios con movilidad.

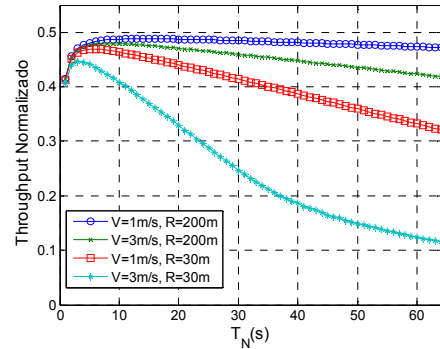


Fig. 7. Throughput normalizado para el escenario traspaso en función de T_N , para los 4 casos reales de la Tabla 1.

V. CONCLUSIONES

Este trabajo ha analizado el efecto que introduce la movilidad sobre sistemas de comunicaciones inalámbricas industriales basados en el estándar WirelessHART. Para ello se han definido diversas métricas capaces de evaluar el rendimiento de las comunicaciones en este tipo de sistemas. Los resultados obtenidos en diversos escenarios y bajo varias condiciones de movilidad y propagación demuestran que en escenarios relativamente sencillos los mecanismos que dispone el estándar WirelessHART no son apropiados para permitir la movilidad de los nodos de la red. Para soportar de forma correcta la movilidad, el estándar podría beneficiarse del empleo de mecanismos que reduzcan el tiempo necesario en el descubrimiento de nuevos vecinos y la reconfiguración de rutas, o una gestión dinámica de la supertrama en base al tiempo de permanencia esperado del nodo bajo la red.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación a través del proyecto CENIT FASyS (CEN-20091034).

REFERENCIAS

- [1] Web oficial del proyecto FASyS: <http://www.fasys.es/>
- [2] WirelessHART spec. 2007. <http://www.hartcomm2.org>
- [3] A. Willig, "Recent and Emerging Topics in Wireless Industrial Communications: A Selection," *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol.4, pp. 102-124, May 2008.
- [4] M. Sepulcre, et. al, "Wireless Connectivity for Mobile Sensing Applications in Industrial Environments", *Proc. IEEE International Symposium on Industrial Embedded Systems (SIES)*, pp. 111-114, 15-17 June 2011.
- [5] R. Silva, et al, "Mobility in WSNs for critical applications", *Proc. IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, 28 June - 1 July 2011, pp. 451-456.
- [6] Zinonos, et al, "S-GinMob: Soft-handoff solution for mobile users in industrial environments", *Proc. Distributed Computing in Sensor Systems and Workshops (DCOSS)*, 27-29 June 2011, pp. 1-6.