

Capacidad de Redes Inalámbricas de Comunicaciones Industriales considerando Nodos Móviles

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- Wireless communication technologies will represent an essential technological component of the Factories of the Future. To this aim, wireless sensor networking technologies are being evolved to overcome the industrial challenging propagation environments and to guarantee their strict QoS requirements. An even greater challenge is to ensure the strict QoS with mobile devices (e.g. when a mote is carried by a worker or industrial vehicle) and under varying resource demands. In this context, it is important that the capacity of industrial wireless sensor networks is adequately dimensioned. This paper analyzes the schedulability or capacity of TDMA-based industrial wireless sensor networks using centralized management under different topologies and scenarios.

I. INTRODUCCIÓN

La importancia de los trabajadores en la mejora de la productividad y la competitividad sitúa su seguridad y su salud en el centro de la agenda del nuevo marco Europeo de Fábrica del Futuro (FoF, *Factory of the Future*). En este contexto, el proyecto FASyS (Fabrica Absolutamente Segura y Saludable) [1] está trabajando en el desarrollo de tecnologías para la monitorización en todo momento del entorno y las condiciones de los trabajadores. Este proceso de monitorización será llevado a cabo gracias a sistemas de comunicaciones inalámbricas heterogéneos de corta, media y larga distancia de FASyS. Las comunicaciones de corta distancia serán realizadas a través del despliegue de redes de sensores inalámbricas (WSN, *Wireless Sensor Networks*) debido a su flexibilidad y a su bajo coste. El despliegue de sensores inalámbricos permite una continua monitorización in situ de las condiciones de salud y seguridad de los trabajadores. Sin embargo, es necesario el desarrollo de protocolos de comunicaciones para mantener unos adecuados niveles de calidad de servicio (QoS, *Quality of Service*) bajo entornos adversos de propagación, como puede ser la presencia de múltiples elementos obstructores en las fábricas [2] o condiciones de movilidad.

En entornos industriales, la movilidad puede estar asociada a dispositivos WSN instalados en trabajadores o en vehículos industriales. La presencia de estos dispositivos con movilidad en redes de sensores inalámbricas implica que las rutas y los enlaces que las componen puedan variar dinámicamente. La variación de las rutas y los enlaces puede ser tanto en los parámetros de calidad de las mismas como en el número de enlaces que componen cada ruta. En [3] se discuten diversos protocolos WSN desarrollados hasta la fecha para soportar movilidad pero que no logran garantizar una QoS extremo a extremo. Trabajos como [4] y [5] han

evaluado la conectividad en presencia de nodos con movilidad. En [4] se ha evaluado experimentalmente el impacto de las condiciones de propagación en entornos industriales con nodos móviles sobre la calidad de los enlaces. En cambio, en [5] se han estudiado y discutido diversas topologías de *Mobile* WSN para escoger el modelo que mejora la conectividad de la red en su conjunto, manteniendo un equilibrio con el gasto de energía empleada. La variación de las rutas y de los enlaces como consecuencia de la movilidad, implica la necesidad de una cantidad de recursos variable en el tiempo. En este sentido, el trabajo realizado en [6] evalúa la viabilidad de la programación de un conjunto de nodos que pueden tener conectividad con distintos puntos de acceso conectados entre ellos mediante conmutadores Ethernet industrial. Previamente en [7] ya se presentaron las primeras expresiones para obtener la capacidad de una red de sensores con múltiples saltos antes de realizar el despliegue estático de los nodos.

Los estudios anteriores se han centrado en redes sensoriales inalámbricas que no han sido diseñadas para garantizar los altos niveles de QoS requeridos en entornos industriales. Para garantizar dichos requisitos se ha desarrollado el estándar WirelessHART [8]. Este estándar fue desarrollado teniendo como objetivo garantizar los requerimientos de QoS de nodos estáticos de forma centralizada. WirelessHART opera en la banda de frecuencia de los 2.4GHz, y se basa en el IEEE 802.15.4, sobre el que añade la técnica de acceso múltiple por división de tiempo (TDMA, *Time Division Multiple Access*). Esta técnica mejora la robustez de las transmisiones al evitar la contención por el medio inalámbrico. WirelessHART realiza una división del tiempo en intervalos fijos, llamados *slots*, cada uno de ellos con una duración de diez milisegundos. Los *slots* son organizados en supertramas que son periódicamente repetidas. El gestor de la red WirelessHART (NM, *Network Manager*) es el responsable de distribuir, de forma centralizada, los *slots* o recursos a los distintos nodos que componen la red. Con una distribución centralizada se previene que un mismo *slot* pueda ser asignado a dos nodos diferentes, de forma que los nodos no necesitan tener que realizar una contención por el medio en el momento de transmitir.

Si bien WirelessHART opera satisfactoriamente en entornos estáticos, su funcionamiento y rendimiento pueden verse degradados en entornos con movilidad a causa de la programación centralizada que le caracteriza. Por ello, es

importante dimensionar adecuadamente este tipo de redes para que puedan soportar la carga esperada de usuarios y tráfico. En este contexto, este trabajo estudia la capacidad de redes de tipo WirelessHART de proporcionar una programación en tiempo real que cumpla los requisitos de transmisión de todos los nodos que componen la red. El estudio tiene en cuenta la movilidad de los nodos. Dicha movilidad puede resultar en que la red no disponga de recursos suficientes para satisfacer los requerimientos de todos los nodos bajo ciertas distribuciones de los mismos. Si bien el estudio toma como modelo base el estándar WirelessHART por su posición dominante en entornos industriales, sus conclusiones podrían ser extensibles a cualquier protocolo o estándar TDMA centralizado.

II. CONDICIONES DE ESTUDIO

El presente estudio considera una arquitectura centralizada tipo WirelessHART donde todos los mensajes de datos son transmitidos hasta un único nodo en la red inalámbrica denominado punto de acceso (AP, *Access Point*). Se considera que el AP asume las funciones de *Network Manager*, y que él es el encargado de planificar las transmisiones de todos los nodos de la red y de garantizar que se cumplan los niveles exigidos de QoS. El punto de acceso sólo dispone de una radio, y por tanto sólo puede recibir o transmitir de forma inalámbrica un único mensaje de datos en cada *slot*. También se considera, al igual que realiza WirelessHART, que para incrementar la fiabilidad de las comunicaciones no se permite una reutilización del canal de frecuencia en el mismo instante para más de una transmisión de datos. El estudio considera también que los nodos móviles solamente pueden transmitir sus mensajes de datos al punto de acceso. En caso de que un nodo móvil no tenga conectividad con el punto de acceso, puede transmitir sus mensajes de datos hasta el punto de acceso a través de los nodos repetidores fijos desplegados (FN, *Fixed Nodes*). Esta condición conlleva que el área de cobertura de la red esté acotada al área de cobertura de los nodos fijos desplegados.

En este contexto, se asume que los nodos móviles necesitan transmitir sus mensajes de datos con una periodicidad (T_d). Cada mensaje de datos necesita en cada uno de los saltos un *slot* para ser transmitido. El análisis se ha realizado para el caso en que cada nodo móvil necesita transmitir un mensaje de datos cada segundo ($T_d=1$ seg.) y que la duración del *slot* es de 10 milisegundos ($t_s=10$ ms). Esto implica que para garantizar los requerimientos de los nodos admitidos en la red, cada segundo todos los nodos han de tener asignada una ruta de *slots* para enviar un mensaje de datos al punto de acceso. En otras palabras, la red será capaz de garantizar los requisitos de QoS establecidos cuando sea posible la programación de las transmisiones de todos los nodos móviles que la forman. Las condiciones consideradas en este estudio resultan en que el máximo número de nodos a los que la red puede proporcionar QoS es 100, y se da cuando todos ellos están a un salto del punto de acceso. En situaciones en las que alguno de los nodos se encuentre a más de un salto del punto de acceso, dicho nodo necesitará más de un *slot* para la transmisión de sus datos hasta dicho punto de acceso, y por tanto el número de nodos que podrá soportar la red disminuirá. Los resultados obtenidos en este estudio pueden ser fácilmente extrapolables a otras duraciones de *slots* o a otras frecuencias de envío de mensajes.

III. TOPOLOGÍAS DE RED

El presente estudio considera cuatro topologías de red con gestión centralizada (Fig. 1). Para todas las topologías, la distancia entre dos nodos con conectividad se considera fija e igual al rango de cobertura (R). En este estudio, además se asume que un mensaje de datos es recibido correctamente por el destinatario si el receptor se encuentra dentro del área de cobertura del transmisor. La topología 1 considera un punto de acceso que sólo puede recibir mensajes de datos de los nodos situados bajo su área de cobertura. Esta primera topología permite evaluar el número de nodos móviles que pueden ser soportados por la red, considerando que todas las transmisiones de mensajes de datos son enviados directamente al punto de acceso. La topología 2 considera además dos nodos fijos repetidores (FN₁ y FN₂) directamente conectados con el punto de acceso. Los nodos fijos retransmiten los mensajes recibidos desde el nodo origen hasta el destino del mensaje. La colocación de dos nodos fijos retransmisores, según se muestra en la topología 2 de la Fig. 1, logra un aumento del área de cobertura total de la red del 221% con respecto a la topología 1. Esta segunda topología es propuesta para evaluar cómo afecta al número máximo de nodos móviles soportados por la red un incremento del número de saltos entre el emisor y el receptor del mensaje. La topología 3 considera un incremento del número de nodos fijos conectados directamente al punto de acceso, concretamente cuatro nodos fijos repetidores (FN₁, FN₂, FN₃ y FN₄). Con cuatro nodos fijos retransmisores desplegados, se logra un aumento del área de cobertura total de la red del 299% con respecto a la topología 1. La topología 4 considera dos nodos fijos repetidores (FN₁ y FN₂) directamente conectados con el punto de acceso, y dos nodos fijos repetidores (FN₃ y FN₄) conectados solamente con un nodo fijo repetidor. Esta cuarta topología representa un aumento del área de cobertura total de la red del 343% con respecto a la topología 1, y es propuesta para evaluar el efecto que introduce disponer de un mayor número de saltos.

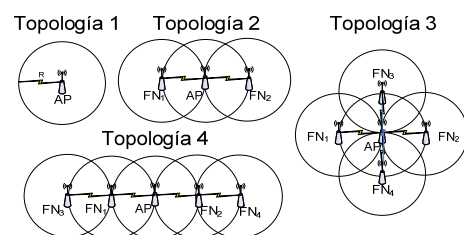


Fig. 1. Topologías de red.

IV. ANÁLISIS DE CAPACIDAD

A. Escenarios de Evaluación

Un aspecto importante para analizar la capacidad de una red es la distribución de los nodos móviles en el área de cobertura de la red. El estudio realizado considera un primer escenario (*mejor caso*) en el cual todos los nodos se encuentran, en todo instante, a un salto del punto de acceso. El segundo escenario considerado (*peor caso*) asume que todos los nodos se encuentran, en todo instante, a un salto de alguno de los nodos fijos repetidores desplegados a un mayor número de saltos del punto de acceso. En este segundo caso, los nodos móviles necesitarán un mayor número de saltos para hacer llegar su mensaje de datos hasta el punto de acceso en función a la topología bajo estudio. El tercer

escenario (*distribución uniforme*) asume que la probabilidad de que un nodo móvil pueda encontrarse en una determinada zona de la fabrica es uniforme para toda el área de cobertura de la red. Este escenario representa el modelo de movilidad más simple posible. Finalmente, el cuarto escenario (*distribución normal*) considera que la probabilidad de que un nodo móvil pueda encontrarse en una determinada zona del área sigue una distribución normal en la direcciones x e y , y que está centrada en una determinada posición. La distribución normal tiene una función de densidad (1), con media μ , varianza σ^2 y distancia al origen de coordenadas r .

$$f_x(r) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{r-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (1)$$

Por defecto en el escenario *distribución normal* se escoge una varianza σ^2 igual al radio de cobertura R y una media μ igual a cero. Considerar $\mu=0$ implica que la función de densidad de probabilidad está centrada en el origen de coordenadas (posición del punto de acceso). En la Fig. 2 se muestra el despliegue de 100 nodos móviles en un determinado instante para los cuatro escenarios considerados bajo la topología 3. En esta representación se considera el mismo rango de cobertura (200 metros) para todos los nodos del escenario; el punto de acceso, los nodos fijos repetidores y los nodos móviles.

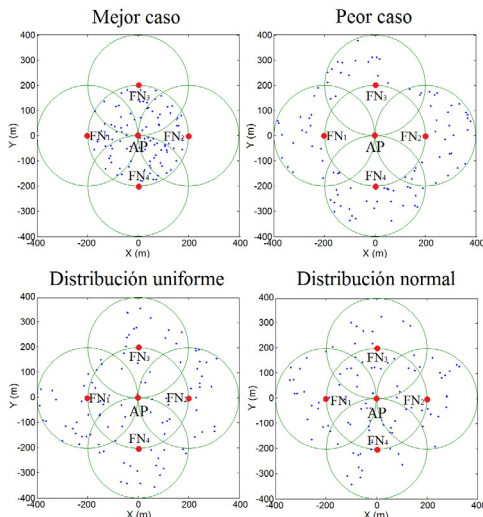


Fig. 2. Escenarios de evaluación bajo la topología 3.

B. Resultados

Los resultados obtenidos tratan de mostrar en qué medida la red es capaz de garantizar los requisitos de QoS establecidos en las distintas topologías y escenarios propuestos. Para ello, para cada topología propuesta se ha evaluado por un lado el número de nodos a los que podría proporcionarse un adecuado nivel de QoS en el *mejor caso* y *peor caso*. El número de nodos en el *mejor caso* para las distintas topologías analizadas es siempre 100, puesto que en este caso se considera que están todos a un salto del punto de acceso. Considerando el *peor caso*, el número de nodos a los que se puede proporcionar un adecuado nivel de QoS dependerá de la topología concreta que se considere. Por otro lado, variando el número de nodos, se han generado múltiples disposiciones aleatorias de nodos siguiendo las distribuciones uniforme y normal previamente descritas. Para cada disposición aleatoria de nodos, se ha evaluado si la red sería capaz de programar las transmisiones de todos los nodos, y por tanto capaz de de garantizar los requisitos de

QoS establecidos. Analizando las distintas disposiciones de nodos generadas, se ha evaluado la probabilidad de que la red sea capaz de garantizar los requisitos de QoS establecidos.

Los resultados obtenidos para la topología 1, independientemente del escenario de evaluación, revelan una probabilidad de que la red sea capaz de garantizar los requisitos de QoS de todos los nodos igual a uno cuando el número de nodos móviles es inferior a 100, y una probabilidad de que la red sea capaz de garantizar los requisitos de QoS de todos los nodos igual a cero en caso contrario. Esto indica que, independientemente de la posición concreta de los nodos móviles dentro del escenario, se puede proporcionar QoS a 100 nodos móviles cuando todos están a un salto del punto de acceso, como previamente se apuntó en el apartado de condiciones del estudio.

Para la topología 2, la Fig. 3 muestra la probabilidad de que la red sea capaz de garantizar los requisitos de QoS de todos los nodos en función del número de nodos desplegados y para cada uno de los cuatro escenarios planteados. En el escenario *peor caso*, se obtiene que el la capacidad de la red es de 50 nodos. Este resultado es consecuencia de que en el escenario *peor caso*, cada nodo necesita dos de los 100 slots que hay cada segundo para transmitir el mensaje hasta el destino. El primer slot para enviar el mensaje al nodo fijo, y el segundo para que el nodo fijo lo retransmita hasta el punto de acceso. En el escenario *mejor caso*, los resultados son los mismos que si se evalúa la topología 1, es decir soportan un máximo de 100 nodos móviles. En cambio en los escenarios que asumen una distribución uniforme o normal de la posición de los nodos, obtienen una capacidad de nodos móviles de 57 y 64, respectivamente. Esto supone un ligero aumento de la capacidad de los nodos móviles soportados, en todo instante, con respecto al escenario *peor caso*. El hecho de que la cantidad de nodos móviles soportados sea mayor en el escenario con una distribución normal que en el escenario con una distribución uniforme, es consecuencia de una mayor probabilidad de que los nodos móviles estén conectados directamente al punto de acceso bajo una distribución normal.

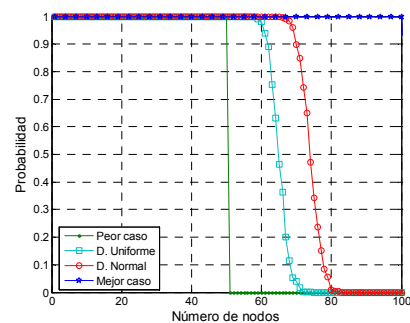


Fig. 3. Probabilidad de garantizar los requisitos de QoS de todos los nodos para los distintos escenarios evaluados en la topología 2.

Los resultados obtenidos para la topología 3, presentados en la Fig. 4, siguen la misma tendencia que los obtenidos en la topología 2. Es de destacar que la cantidad de nodos móviles soportados bajo los escenarios *distribución uniforme* y *distribución normal* es menor en la topología 3 que en la topología 2. Esta reducción de la capacidad de la red se produce por disponer en la topología 3 de una mayor área en la que es necesario el empleo de dos saltos para transmitir los mensajes de datos hasta el punto de acceso, y por tanto hay una mayor probabilidad de que los nodos móviles necesiten dos slots para transmitir sus datos.

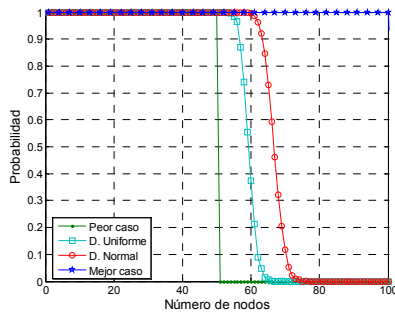


Fig. 4. Probabilidad de garantizar los requisitos de QoS de todos los nodos para los distintos escenarios evaluados en la topología 3.

En los resultados obtenidos considerando la topología 4, presentados en la Fig. 5, destaca que la capacidad de la red se ve reducida significativamente respecto a las otras topologías para los escenarios *distribución uniforme* y *peor caso*. Esto es así debido a que la topología 4 dispone de un mayor número de saltos posibles. En cambio la capacidad no varía significativamente en el escenario *distribución normal*, como consecuencia de que en este escenario los nodos móviles están concentrados en las proximidades del punto de acceso (siguiendo una distribución de los nodos normal centrada en el origen de coordenadas, ubicación del punto de acceso).

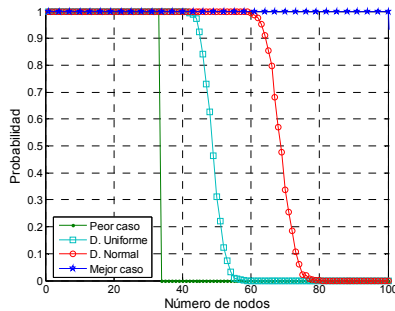


Fig. 5. Probabilidad de garantizar los requisitos de QoS de todos los nodos para los distintos escenarios evaluados en la topología 4.

En la situación en la que la posición de los nodos móviles en un determinado instante sigue una distribución normal, un aspecto muy importante es la colocación del punto de acceso. El punto de acceso se ha de situar en el lugar con una mayor concentración de nodos móviles, minimizando así los recursos empleados y aumentando la capacidad de la red. En la Fig. 6, se muestra para la cuarta topología, la probabilidad de que la red sea capaz de garantizar los requisitos de QoS de todos los nodos de tres distribuciones normales centradas en distintas zonas; centrada en el punto de acceso ($\mu=0m$), centrada en FN_2 ($\mu=200m$) y centrada en FN_4 ($\mu=400m$). Los resultados obtenidos ponen de manifiesto la importancia de situar el punto de acceso en la posición donde se encuentra la mayor concentración de nodos ($\mu=0m$) para maximizar la capacidad de la red.

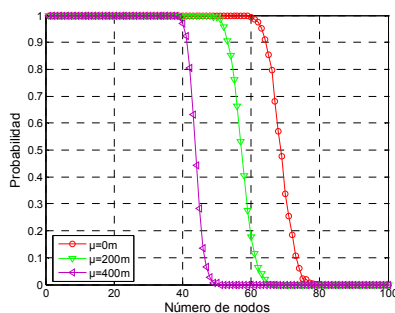


Fig. 6. Probabilidad de garantizar los requisitos de QoS de todos los nodos ante distintos valores de μ con distribución normal en la topología 4.

V. CONCLUSIONES

Las redes de comunicaciones inalámbricas industriales como WirelessHART ofrecen mayores garantías de calidad de servicio que otras redes sensoriales inalámbricas gracias a la consideración de una gestión centralizada. Sin embargo, estas garantías pueden verse truncadas en el caso de redes con nodos móviles debido a la sobrecarga de señalización para la programación del funcionamiento de la red. Es por ello que es indispensable un análisis adecuado de la capacidad que puede soportar este tipo de redes en base a las topologías de red desplegadas y a la movilidad de los nodos. El estudio presentado en este artículo ha analizado dicha capacidad considerando diferentes escenarios de evaluación, y mostrando cómo el peor caso posible en cuanto a movilidad limita la capacidad máxima de las redes al necesitar la reserva de ciertos recursos. Esta problemática podría ser solventada si fuera posible una programación dinámica del uso de los *slots* de comunicación en base a la movilidad de los nodos. De hecho, un importante resultado ha sido la comprobación de cómo la capacidad de la red puede ser aumentada con información de la movilidad de los nodos.

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] A. Willig, "Recent and Emerging Topics in Wireless Industrial Communications: A Selection," *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol.4, pp. 102-124, May 2008.
- [3] Dong, Q. et al, "A Survey on Mobility and Mobility-Aware MAC Protocols in Wireless Sensor Networks," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, (Current available as Early Access Article).
- [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] Sajadian, S, et al, "Improving Connectivity of Nodes in Mobile WSN" *Proc. IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA)*, pp. 364-371, 22-25 March 2011.
- [6] Toscano, E. et al, "Probabilistic feasibility assessment of real-time wireless networks for factory automation with mobile nodes" *Proc. IEEE International Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA)*, pp.1-8, 5-9 Sept. 2011.
- [7] Abdelzاهر, T.R, et al, "On real-time capacity limits of multihop wireless sensor networks," *Proc. IEEE International Real-Time Systems Symposium*, pp. 359- 370, 5-8 Dec. 2004.
- [8] IEC 62591 Ed. 1.0: Industrial communication networks – Wireless communication network and communication profiles – WirelessHART™, International Electrotechnical Commission, IEC, 2010.