

Descubrimiento de Vecinos en Redes Inalámbricas Industriales con Nodos Móviles

Sergio Montero⁽¹⁾, Javier Gozalvez⁽¹⁾, Gonzalo Prieto⁽²⁾
smontero@umh.es, j.gozalvez@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 in order to facilitate the real-time monitoring in the Factories of the Future. However, a major future demand for wireless industrial systems could be the capability to support devices' mobility. The WirelessHART standard provides high levels of reliability for static wireless devices. In mobile wireless systems, the neighbour discovery mechanism is an important feature in network deployments with mobile devices due to the high number of changes in the network topology. To improve the performance of WirelessHART when there are mobile devices, this paper proposes a new neighbour discovery mechanism, called LAN-ND (Listen Advertise Network Neighbour Discovery) that improves the neighbour's discovery probability of WirelessHART standard and reduces the average time needed to discover new neighbouring devices.

I. INTRODUCCIÓN

Las Fábricas del Futuro se beneficiarán del uso y despliegue de las comunicaciones inalámbricas industriales para mejorar las condiciones de salud y seguridad de los trabajadores. En este nuevo concepto trabaja el proyecto FASyS (Fábrica Absolutamente Segura y Saludable), desarrollando soluciones tecnológicas para monitorizar de forma continua las condiciones y el entorno de trabajo, y de este modo evitar los posibles riesgos presentes en entornos industriales. Algunas de esas soluciones están basadas en el despliegue de redes de sensores inalámbricos (WSN, *Wireless Sensor Networks*) dentro de la fábrica.

Los actuales estándares de comunicaciones industriales se han centrado en proporcionar los altos niveles de fiabilidad necesarios para las aplicaciones industriales. Sin embargo, estos estándares carecen de mecanismos que soporten de forma eficiente la movilidad de los nodos o dispositivos. El trabajo [2] presenta un interesante análisis del impacto de la movilidad en WSN, analizando varias contribuciones en las que la gestión de la movilidad se realiza de forma descentralizada. La provisión de altos nivel de calidad de servicio (QoS, *Quality of Service*) en entornos industriales generalmente requiere una gestión centralizada. En este contexto, en [3] se analiza el impacto de la movilidad en el rendimiento del estándar de comunicaciones industriales basado en gestión centralizada WirelessHART [4]. En [3] se destacó la necesidad de diseñar nuevos mecanismo que reduzcan el tiempo requerido para descubrir nuevos dispositivos vecinos móviles. Varios protocolos de descubrimiento de vecinos han sido propuestos en la literatura [5]. No obstante muchos de ellos están basados en mecanismos que requieren que todos los dispositivos

permanezcan en todo instante en el mismo canal o frecuencia. Sin embargo, en WirelessHART los dispositivos cambian constantemente de frecuencia. Además, generalmente los protocolos de descubrimiento de vecinos no están diseñados para evitar colisiones en las transmisiones de los mensajes con los que se ha de detectar nuevos dispositivos vecinos. Estos protocolos de descubrimiento de vecinos con colisiones (no deterministas) no pueden garantizar altos niveles de fiabilidad en el proceso de descubrimiento en un tiempo limitado, si bien ha sido el tipo de mecanismo escogido por WirelessHART para estimar el nivel de señal con sus dispositivos vecinos y para descubrir nuevos dispositivos vecinos.

El futuro despliegue de redes WirelessHART con dispositivos móviles requerirá mecanismos que garanticen una alta probabilidad de descubrimiento de nuevos dispositivos vecinos que aseguren la conectividad de los dispositivos mientras se desplazan por la red. Es de destacar que recientes trabajos, como el presentado en [6], ya están empezando a tener en cuenta despliegues de redes WirelessHART con dispositivos móviles. En este contexto, este artículo propone un protocolo de descubrimiento de vecinos determinista para el estándar de comunicaciones industriales WirelessHART denominado (LAN-ND, *Listen Advertise Network Neighbour Discovery*). Desde el conocimiento de los autores, éste es el primer estudio que propone un protocolo de descubrimiento de vecinos determinista para WirelessHART y lo evalúa en escenarios con movilidad. Este protocolo propuesto incrementa la probabilidad de que los nodos o dispositivos WirelessHART descubran nuevos dispositivos vecinos y reduce el tiempo medio empleado en su descubrimiento.

II. ESTÁNDAR WIRELESSHART

El estándar WirelessHART está basado en el protocolo IEEE 802.15.4 operando en la banda de 2.4GHz. Este estándar añade encima del protocolo IEEE 802.15.4 el mecanismo de acceso al medio por división en el tiempo (TDMA, *Time Division Media Access*) para mejorar su robustez. WirelessHART divide el tiempo en intervalos temporales denominados *slots*, cada uno de ellos con una duración fija de 10 milisegundos. WirelessHART permite la transmisión en hasta 15 frecuencias diferentes, no permitiendo el reuso en un mismo instante de un mismo *slot* en una frecuencia dada para más de una transmisión de datos, salvo en determinados casos excepcionales. Cada enlace de comunicaciones WirelessHART (*link*) entre dos dispositivos

está definido por un *slot* y una de frecuencia. El gestor de la red (NM, *Network Manager*), de forma centralizada organiza los *links* dentro de las supertramas que son periódicamente repetidas. La supertrama de gestión debe de contener 6400 *slots* con una duración de 64 segundos. Entre otras funciones, el NM es también responsable de asignar los *links* a los dispositivos de la red para transmitir DLPDU (*Data Link Protocol Data Unit*). WirelessHART define 5 tipos de DLPDUs, siendo dos los imprescindibles para la gestión de los dispositivos de la red: los *Advertise* DLPDUs y los *Keep-alive* DLPDUs. Los *Advertise* DLPDUs proporcionan información a nuevos dispositivos que quieren acceder a la red acerca de cómo y cuándo han de solicitar el acceso. Los *Keep-alive* DLPDUs facilitan el mantenimiento de la conexión entre dos dispositivos vecinos al evaluar el nivel de señal de cada *Keep-alive* DLPDU recibido. Se ha de resaltar que el NM es también el encargado de gestionar el proceso de entrada de un nuevo dispositivo a la red y del proceso de descubrimiento de vecinos. El proceso de descubrimiento de vecinos permite a los dispositivos de la red descubrir nuevos dispositivos con los que comunicarse directamente. Este proceso es clave para mantener la conectividad de los dispositivos de la red cuando pueden ser móviles y se explica en detalle en el apartado III.

III. PROTOCOLOS DE DESCUBRIMIENTO DE VECINOS

A. Protocolo empleado por WirelessHART

WirelessHART implementa su propia técnica de descubrimiento de dispositivos vecinos. Mediante esta técnica, que en este artículo se denomina WH-ND (*WirelessHART Neighbour Discovery*), los dispositivos tratan de recibir un *Keep-alive* DLPDU enviado por otro dispositivo vecino en un enlace de descubrimiento (*Discovery link*). El *Discovery link* es un *link* común a todos los dispositivos en la red. Cada supertrama de gestión incluye un *Discovery link* donde cada dispositivo de la red aleatoriamente envía un *Keep-alive* DLPDU o escucha la posible transmisión de un *Keep-alive* DLPDU enviado por uno de sus dispositivos vecinos. Es posible que dos o más dispositivos transmitan su *Keep-alive* DLPDU en el mismo *Discovery link*, produciéndose una colisión en recepción en aquellos dispositivos que tengan más de un dispositivo vecino transmitiendo su *Keep-alive* DLPDU en ese mismo instante. En este caso, la presencia de ningún dispositivo vecino es detectada. Para realizar la transmisión de un *Keep-alive* DLPDU en el *Discovery link*, cada dispositivo tiene que seleccionar un tiempo de espera aleatorio entre 0 y un valor máximo asignado por el NM (*Discovery_time*). Cuando el tiempo de espera aleatorio finaliza, el dispositivo debe de transmitir su *Keep-alive* DLPDU en el siguiente *Discovery link* y debe de obtener un nuevo periodo de tiempo aleatorio de espera hasta la siguiente de transmisión de su *Keep-alive* DLPDU. Además, cada dispositivo ha de estar en modo recepción en cada *Discovery link* en el que no transmita su *Keep-alive* DLPDU, pudiendo así descubrir nuevos dispositivos vecinos. Todos los dispositivos mantienen su propia tabla de dispositivos vecinos descubiertos. Cuando un dispositivo recibe un *Keep-alive* DLPDU de otro dispositivo que no tiene considerado como vecino, lo añade a su tabla de vecinos. Periódicamente, cada dispositivo reporta su tabla de vecinos al NM para que la tenga en cuenta en la organización de links, encaminamiento, etc.

B. LAN-ND

En este apartado se presenta el protocolo de descubrimiento de vecinos propuesto en este trabajo. LAN-ND está diseñado para incrementar la probabilidad de descubrimiento de dispositivos vecinos que están un tiempo limitado bajo cobertura de otros dispositivos de la red. Este protocolo de descubrimiento de vecinos determinista está basado en la idea de escuchar DLPDUs transmitidos por los dispositivos de la red para reducir el tiempo medio empleado en su descubrimiento. Sin embargo, en lugar de escuchar *Keep-alive* DLPDUs en *Discovery links*, se propone escuchar *Advertise* DLPDUs en enlaces de anuncio (*Advertise links*). Esta propuesta se fundamenta en que cada *Advertise link* es dedicado a un único dispositivo para la transmisión de su *Advertise* DLPDU, evitando posibles colisiones. Además, el NM configura los dispositivos de la red para que envíen en modo *broadcast* *Advertise* DLPDUs que faciliten el acceso de nuevos dispositivos a la red. Nuestra propuesta emplea la recepción de *Advertise* DLPDU, así como la información que contienen, para mejorar la probabilidad de detección de vecinos de WirelessHART. LAN-ND requiere que el NM envíe a cada dispositivo de la red la información de todos los *Advertise links* (una lista con todos los *links* – *slot* dentro de la supertrama y frecuencia – donde cada dispositivo de la red transmite su *Advertise* DLPDU) y la actualice cuando el NM cambie uno o más *Advertise links*. El NM también ha de programar los dispositivos para que estén en modo recepción cuando otros dispositivos de la red transmiten sus *Advertise* DLPDUs. LAN-ND funciona adecuadamente si el NM programa en cada dispositivo los *links* en los que ha de estar en modo recepción para intentar recibir los *Advertise* DLPDUs enviados por otros dispositivos de la red.

IV. MÉTRICAS DE RENDIMIENTO

En esta sección se detallan las dos métricas que se van a emplear en la comparación de los dos protocolos de descubrimiento de vecinos descritos. En primer lugar se van a definir ciertos parámetros y descripciones que posteriormente son necesarios para la obtención de las dos métricas evaluadas. Se define el número de *slots* que componen una supertrama de gestión como N , y su duración temporal como T_N . Se asume, sin pérdida de generalidad, que en cada supertrama de gestión cada dispositivo dispone de un *link* dedicado para transmitir su *Advertise* DLPDU o un *link* compartido para transmitir su *Keep-Alive* DLPDU, dependiendo del protocolo evaluado. La mayor tasa a la que cada dispositivo puede enviar su *Advertise* DLPDU o su *Keep-Alive* DLPDU es de uno cada supertrama de gestión (N *slots* o T_N segundos). Por un lado, la tasa de transmisiones de *Advertise* DLPDUs es constante para LAN-ND. Por otro lado, la tasa de transmisiones de *Keep-Alive* DLPDUs es variable para WH-ND dado que depende del valor del parámetro *Discovery_time* que previamente le ha asignado el gestor de la red. El número de dispositivos que hay en la zona de cobertura de un determinado dispositivo i se define como H_i y el tiempo que un dispositivo se encuentra dentro de la cobertura del dispositivo evaluado se define como t_{cob} .

A. Probabilidad de descubrimiento

La probabilidad de descubrimiento es la probabilidad de que un dispositivo descubra a otro que se encuentra un tiempo limitado bajo su cobertura. Para obtener esta probabilidad, previamente se van a definir unos parámetros intermedios. La

probabilidad de que con el mecanismo WH-ND el dispositivo i transmita su *Keep-Alive* DLPDU en un *Discovery link* (P_i) y la probabilidad de que i esté en recepción (R_i) pueden ser expresadas como:

$$P_i = \frac{2}{DL_i + 1}, \quad R_i = 1 - P_i = \frac{DL_i - 1}{DL_i + 1} \quad (1)$$

donde $DL_i = \text{Discovery_time}/T_N$ representa el número máximo de *Discovery link* entre dos *Keep-Alive* DLPDU consecutivos transmitidos por el dispositivo i . A partir de las probabilidades definidas en (1) y considerando un modelo de propagación ideal, puede calcularse la probabilidad $P_{i,j}^{H_i}$, que es la probabilidad de que un dispositivo i transmita su *Keep-Alive* DLPDU en un *Discovery link* y sea recibido sin colisión por el dispositivo j (ninguno de los H_i vecinos de i , excepto j , transmite su *Keep-Alive* DLPDU en ese *Discovery link*). Esta probabilidad es obtenida como:

$$P_{i,j}^{H_i} = P_j \cdot R_i \cdot \prod_{\substack{h=1 \\ h \neq j}}^{H_i} R_h \quad (2)$$

Si la probabilidad definida en (2) se extiende para considerar k *Discovery link*, es decir la probabilidad de que i reciba al menos un *Keep-alive* DLPDU de j sin colisión en k *Discovery links* ($P_{i,j}^{H_i,k}$), ésta puede ser expresada como:

$$P_{i,j}^{H_i,k} = 1 - (1 - P_{i,j}^{H_i})^k \quad (3)$$

Mediante la ecuación (3) es posible presentar en (4) la expresión de P_{des} para WH-ND:

$$P_{des} = L_k \cdot P_{i,j}^{H_i,k} + L_{k+1} \cdot P_{i,j}^{H_i,k+1} \quad (4)$$

donde L_k representa la probabilidad de que el dispositivo i esté bajo la cobertura de j en k *Discovery links* (cuando i está t_{cob} bajo la cobertura de j) y k , L_k y L_{k+1} son obtenidos como:

$$k = \left\lfloor \frac{t_{cob}}{T_N} \right\rfloor, \quad L_k = 1 - \left(\frac{t_{cob}}{T_N} - \left\lfloor \frac{t_{cob}}{T_N} \right\rfloor \right), \quad L_{k+1} = \frac{t_{cob}}{T_N} - \left\lfloor \frac{t_{cob}}{T_N} \right\rfloor \quad (5)$$

En (6) se presenta la expresión de P_{des} para LAN-ND considerando un modelo de propagación ideal. Bajo este modelo, cada *Advertise* DLPDU transmitido es recibido por todos los dispositivos que se encuentran en modo recepción dentro de su rango de cobertura. Así, para LAN-ND P_{des} sólo depende del cociente de t_{cob} entre T_N , obteniéndose como:

$$P_{des} = \begin{cases} 1 & \text{si } \frac{t_{cob}}{T_N} \geq 1 \\ \frac{t_{cob}}{T_N} & \text{si } \frac{t_{cob}}{T_N} < 1 \end{cases} \quad (6)$$

B. Tiempo medio de descubrimiento

El tiempo medio de descubrimiento es el tiempo medio requerido para descubrir un nuevo dispositivo vecino. Este tiempo t_{des} equivale al tiempo medio transcurrido desde el instante en que un dispositivo entra en el rango de cobertura de otro hasta el instante en que éste es descubierto. La expresión de t_{des} es presentada en (7) para WH-ND y en (8) para LAN-ND. En ambas expresiones $T_N/2$ representa el tiempo medio transcurrido desde el instante en que el dispositivo entra en el rango de cobertura de otro dispositivo

hasta el instante del primer *Discovery link* o *Advertise link*, dependiendo del protocolo considerado.

$$t_{det} = \frac{T_N}{2} + T_N \cdot \sum_{k=1}^{\infty} k \cdot \left((1 - P_{i,j}^{H_i})^{k-1} - (1 - P_{i,j}^{H_i})^k \right) \quad (7)$$

$$t_{det} = \frac{T_N}{2} \quad (8)$$

V. EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO

En esta sección se compara el rendimiento de WH-ND con LAN-ND bajo diferentes topologías. El análisis realizado considera un modelo de propagación ideal en el que una transmisión es recibida correctamente si el receptor está dentro del rango de cobertura del emisor. Además, se considera una programación de los *links* en la que dos *Advertise* DLPDUs no tienen en el mismo *slot* e igual o diferente frecuencia.

A. Topologías

La evaluación del rendimiento ha sido realizada para las tres topologías representadas en la Fig. 1. Todos los dispositivos mostrados representan dispositivos estáticos. El dispositivo identificado como *NM* representa el dispositivo gestor de la red. En todas las topologías, la distancia entre dos dispositivos estáticos es fija e igual al rango de transmisión (R). Las diferentes topologías tienen la característica de que el dispositivo A , representado más oscuro, tiene diferentes cantidades de dispositivos vecinos H_A , en concreto $H_A=2$, $H_A=3$ y $H_A=4$ vecinos para las topologías 1, 2 y 3, respectivamente. La evaluación del rendimiento es realizada añadiendo un dispositivo móvil adicional que se encuentra un tiempo t_{cob} dentro del área de cobertura del dispositivo A . Al considerar el dispositivo móvil, el dispositivo A tiene entonces un total de $H_A=3$, $H_A=4$ y $H_A=5$ vecinos para las topologías 1, 2 y 3, respectivamente.

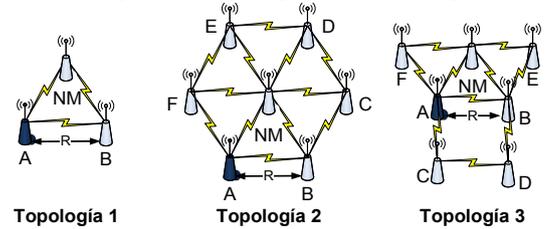


Fig. 1. Topologías empleadas.

B. Resultados

Los resultados son obtenidos para $T_N=64$ segundos, duración de la supertrama de gestión recomendada por el estándar WirelessHART. Cuando se evalúa el protocolo WH-ND, en primer lugar se ha de determinar el valor de DL_i que maximiza la probabilidad de descubrimiento de vecinos. En la Fig. 2 se presenta la probabilidad de descubrimiento del dispositivo móvil P_{des} , por parte del dispositivo A , en función de t_{cob} para diferentes valores de DL_i cuando se emplea el protocolo WH-ND en la topología 1. En esta figura se puede observar como para el valor de $DL_i=7$, A obtiene una mayor probabilidad P_{des} independientemente de t_{cob} . De forma análoga se han obtenido que los valores $DL_i=9$ y $DL_i=11$, son los valores de DL_i con los que A obtiene una mayor P_{des} en un rango de valores de t_{cob} para la topología 2 y la topología 3, respectivamente. Estos DL_i serán los establecidos en la comparación entre WH-ND y LAN-ND.

La Fig. 3 presenta la probabilidad de descubrimiento del dispositivo móvil, P_{des} , por parte de A en función de t_{cob} para

las topologías representadas en la Fig. 1. WH-ND T1, WH-ND T2 y WH-ND T3 representan el rendimiento alcanzado por el protocolo WH-ND en las topologías 1, 2 y 3, respectivamente. Por un lado, es importante resaltar que el rendimiento del protocolo LAN-ND no depende de la topología de la red, y por consiguiente no depende del número de vecinos que tiene A . Por otro lado, el rendimiento del protocolo WH-ND sí depende de la topología. En particular, los resultados han mostrado que en la topología 3, topología en la que A tiene la mayor cantidad de dispositivos vecinos, se obtiene la menor probabilidad de descubrimiento del dispositivo móvil. Los resultados obtenidos muestran que el protocolo LAN-ND propuesto mejora significativamente la probabilidad de descubrimiento de vecinos, especialmente en valores de t_{cob} alrededor de la duración de la supertrama de gestión. Los resultados presentados en la Fig. 4, para $T_N=16$ segundos, muestran tendencias similares en términos de diferencia de rendimiento entre LAN-ND y WH-ND. Sin embargo, como es de esperar, la reducción de la duración de la supertrama incrementa la probabilidad de descubrimiento de ambos protocolos para un mismo valor de t_{cob} .

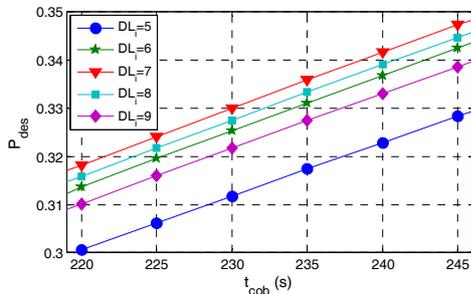


Fig. 2. Probabilidad de descubrimiento de vecinos del protocolo WH-ND en función de t_{cob} para diferentes valores de DL_i cuando $T_N=64$ en la topología 1.

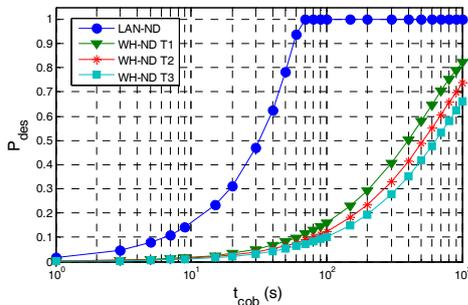


Fig. 3. Probabilidad de descubrimiento de vecinos de ambos protocolos en función de t_{cob} cuando $T_N=64$.

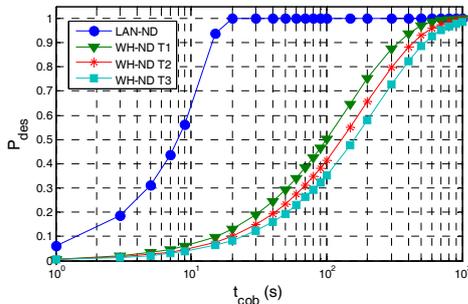


Fig. 4. Probabilidad de descubrimiento de vecinos de ambos protocolos en función de t_{cob} cuando $T_N=16$.

La Tabla 1 presenta el tiempo medio requerido para que A descubra un nuevo dispositivo móvil en función de T_N . Los resultados son presentados para ambos protocolos y para las

distintas topologías de la Fig. 1. Los resultados obtenidos muestran que en el caso de WH-ND, cuando el dispositivo A tiene un mayor número de dispositivos vecinos (H_A), mayor tiempo medio es requerido para descubrir un nuevo dispositivo vecino (t_{des}). Esto es debido al hecho de que a mayor número de dispositivos vecinos, más *Discovery links* son necesarios para recibir un *Keep-alive* DLPDU sin colisión, y poder descubrir nuevos vecinos. Sin embargo, el protocolo LAN-ND reduce significativamente el tiempo medio requerido para detectar nuevos dispositivos vecinos, siendo particularmente relevante para dispositivos en movimiento. Además, para el protocolo LAN-ND el rendimiento es independiente de la topología de la red.

	H_A	WH-ND	LAN-ND
Topología 1	3	$8,980 \cdot T_N$	$0,500 \cdot T_N$
Topología 2	4	$11,686 \cdot T_N$	$0,500 \cdot T_N$
Topología 3	5	$14,318 \cdot T_N$	$0,500 \cdot T_N$

Tabla 1. Tiempo medio de descubrimiento del dispositivo móvil (t_{des}) por parte del dispositivo A .

VI. CONCLUSIONES

Este artículo ha propuesto y evaluado un nuevo protocolo de descubrimiento de vecinos (LAN-ND) que mejora la conectividad de los dispositivos móviles en redes inalámbricas de comunicaciones industriales con gestión centralizada. La propuesta ha sido comparada con el esquema de descubrimiento de vecinos empleado por WirelessHART que muestra ser ineficiente en presencia de dispositivos en movimiento. Los resultados obtenidos han demostrado que el protocolo LAN-ND propuesto reduce el tiempo medio necesario para detectar nuevos dispositivos vecinos y aumenta la probabilidad de descubrimiento de dispositivos vecinos cuando éstos son móviles y están un tiempo limitado bajo su cobertura.

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.fasy.es/>
- [2] Q. Dong and W. Dargie, "A Survey on Mobility and Mobility-Aware MAC Protocols in Wireless Sensor Networks", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol.15, no.1, pp.88,100, First Quarter 2013.
- [3] S. Montero; J. Gozalvez; M. Sepulcre; G. Prieto, "Impact of mobility on the management and performance of WirelessHART industrial communications", *Proceedings of the 17th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA'12)*, 17-21 September 2012, Kraków (Poland).
- [4] IEC 62591 Ed. 1.0: Industrial communication networks -Wireless communication network and communication profiles- WirelessHART™, International Electrotechnical Commission, IEC, 2010.
- [5] V. Galluzzi and T. Herman, "Survey: Discovery in Wireless Sensor Networks", *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol 2012, Article ID: 271860, 2012.
- [6] X. Zhu, et al, "RoamingHART: A Collaborative Localization System on WirelessHART", *Proceedings of the 18th IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium (RTAS 2012)*, 17-19 April 2012, Beijing (China).