



Universidad Miguel Hernández de Elche

Departamento de Ciencia de Materiales, Óptica y Tecnología Electrónica

# **Protocolos de Comunicación para Redes Inalámbricas Industriales con Movilidad**

Sergio Montero Selma

Directores: Dr. Javier Gozávez Sempere  
Dr. Miguel Sepulcre Ribes

Tesis para el grado de Doctor

Junio 2017





D<sup>a</sup> PIEDAD NIEVES DE AZA MOYA, Directora del Departamento de Ciencia de Materiales, Óptica y Tecnología Electrónica de la Universidad Miguel Hernández de Elche,

#### INFORMA

favorablemente que la Tesis titulada “Protocolos de Comunicación para Redes Inalámbricas Industriales con Movilidad” de la que es autor el doctorando Sergio Montero Selma, y dirigida por el Dr. Javier Gozávez Sempere y por el Dr. Miguel Sepulcre Ribes, tiene la conformidad de este departamento para que sea depositada y presentada para su exposición pública, ya que cumple con los requisitos en cuanto a forma y contenido.

Para que conste, en cumplimiento de la legislación vigente, firma la presente en Elche, a        de        de 2017.

Fdo. D<sup>a</sup> Piedad Nieves de Aza Moya  
Directora del Departamento de Ciencia de Materiales, Óptica y  
Tecnología Electrónica







JAVIER GOZÁLVEZ SEMPERE, Doctor Ingeniero y Profesor Titular de la Universidad Miguel Hernández de Elche, y MIGUEL SEPULCRE RIBES, Doctor Ingeniero y Profesor Ayudante Doctor de la Universidad Miguel Hernández de Elche,

CERTIFICAN

que la Tesis titulada “Protocolos de Comunicación para Redes Inalámbricas Industriales con Movilidad” de la que es autor el doctorando Sergio Montero Selma ha sido realizada bajo su dirección.

Considerando que se trata de un trabajo original de investigación que reúne los requisitos establecidos en la legislación vigente, autorizan su presentación. Y para que así conste, firman el presente certificado,

Elche, a        de        de 2017

Fdo. Javier Gozávez Sempere

Fdo. Miguel Sepulcre Ribes



Este trabajo ha sido financiado por la Generalitat Valenciana a través de la Ayuda para la Contratación de Personal Investigador en Formación de Carácter Predoctoral del Programa VALi+d ACIF/2013/060 y a través de la Beca para Estancias de Contratados Predoctorales en Centros de Investigación Fuera de la Comunidad Valenciana BEFPI/2015/019, por el Ministerio de Ciencia e Innovación a través del proyecto CENIT FASyS (CEN-20091034), y por el Ministerio de Economía y Competitividad y los fondos FEDER a través del proyecto 5GEAR (TEC2014-57146-R).



# Resumen

Las redes inalámbricas industriales están llamadas a ser uno de los pilares tecnológicos fundamentales de la Industria 4.0. Estas redes han sido desarrolladas para operar en condiciones de comunicación adversas, como las que pueden encontrarse en ciertos entornos industriales, y para proporcionar elevados niveles de fiabilidad y baja latencia en las comunicaciones. Sin embargo, un completo desarrollo de los sistemas cooperativos y cognitivos de la Industria 4.0 requiere que las redes inalámbricas industriales soporten también la conectividad de dispositivos móviles. La capacidad de dar soporte a dispositivos móviles no fue tomada en cuenta para el desarrollo de los actuales estándares de comunicaciones inalámbricas industriales, como WirelessHART. Mantener altos niveles de fiabilidad y baja latencia en comunicaciones industriales con dispositivos móviles es un importante reto técnico. Además, mantener la conectividad con dispositivos móviles puede requerir de frecuentes reconfiguraciones de la red a medida que los dispositivos se desplazan. El coste (en señalización, retardo, eficiencia energética, etc.) puede resultar considerable si tenemos en cuenta que las redes inalámbricas industriales son gestionadas de forma centralizada. Si bien esta gestión centralizada ofrece importantes ventajas para satisfacer los estrictos requisitos de las aplicaciones industriales en redes donde los dispositivos son estáticos, también presenta importantes retos si debe soportar la conexión de dispositivos móviles.

Esta tesis doctoral defiende la necesidad de estudiar y evolucionar los actuales estándares de comunicaciones inalámbricas industriales para soportar de forma eficiente la movilidad de los dispositivos a la vez que se garantizan adecuados niveles de fiabilidad y latencia de las comunicaciones. El objetivo principal de la presente tesis doctoral es el estudio, propuesta y evaluación de nuevos protocolos de comunicación que mejoren el funcionamiento de las redes inalámbricas industriales en presencia de dispositivos móviles. Para abordar el problema, en primer lugar se ha evaluado el impacto que supone el despliegue de dispositivos móviles en el funcionamiento y rendimiento de los actuales estándares de comunicaciones inalámbricas industriales.

Esta evaluación ha permitido identificar tres posibles líneas de investigación necesarias para mejorar el rendimiento de las comunicaciones inalámbricas industriales cuando se requiere dar soporte a dispositivos con movilidad. En el marco de la presente tesis doctoral se han abordado investigaciones en las dos líneas consideradas de mayor impacto y recorrido: la detección de dispositivos vecinos, y la gestión dinámica de los enlaces de comunicación y las rutas multi-salto en redes inalámbricas industriales. En relación con la primera de las líneas, esta tesis propone tres nuevos protocolos de descubrimiento de vecinos que aplican mecanismos deterministas para reducir el tiempo empleado en descubrir nuevos vecinos con respecto al actual protocolo incluido en el estándar WirelessHART. Dos de ellos explotan información de la topología de la red y la naturaleza de los dispositivos (estáticos o móviles) para mejorar la eficiencia en cuanto a la utilización de los enlaces de comunicación y al consumo de energía. En relación con la segunda de las líneas de investigación objeto de estudio en esta tesis, se ha propuesto un nuevo algoritmo de asignación de enlaces de comunicación (*link scheduling*) para redes inalámbricas industriales basado en el concepto de testigo virtual (*virtual token*). El algoritmo propuesto emplea enlaces de comunicación compartidos entre los dispositivos que forman una misma ruta origen-destino con el fin de minimizar el retardo y maximizar la fiabilidad *end-to-end* en la entrega de mensajes. Por último, esta tesis también ha investigado en redes con dispositivos móviles, la asignación de enlaces de comunicación cuando se aborda de forma conjunta a la selección de rutas. En este contexto, por un lado la tesis estudia el impacto de la selección del primer salto en la comunicación del dispositivo móvil sobre el área en la cual es posible garantizar una fiabilidad superior a la fiabilidad objetivo predefinida. Por otro lado, se proponen, evalúan y comparan tres técnicas para la reasignación de enlaces de comunicación y rutas en presencia de dispositivos móviles cuando se requiere garantizar la fiabilidad objetivo marcada por las aplicaciones.

Los estudios llevados a cabo demuestran que las propuestas de esta tesis doctoral contribuyen a mejorar el rendimiento, fiabilidad y eficiencia de los actuales estándares de comunicaciones inalámbricas industriales en presencia de dispositivos móviles. Los protocolos y mecanismos propuestos apuestan por evolucionar los actuales estándares, con el fin de maximizar su impacto y aplicabilidad.

Esta tesis ha sido realizada bajo la modalidad de presentación de tesis doctorales con un conjunto de publicaciones, recogida en la normativa de estudios de doctorado de la Universidad Miguel Hernández de Elche.

# Agradecimientos

En primer lugar me gustaría agradecer a mis directores de tesis, el Dr. Javier Gozávez y el Dr. Miguel Sepulcre por su supervisión, orientación, inspiración, así como por sus consejos, que han contribuido de forma significativa a la calidad de la investigación recogida en esta tesis.

También me gustaría agradecer al resto de compañeros del laboratorio Uwicore, tanto a los que están, como la Dr. Mari Carmen Lucas, el Dr. Baldomero Coll, Jesús Mena, Rafael Molina, Manuel González, Daniel Valero y Daniel Sempere, como los que han iniciado nuevos proyectos fuera del grupo como el Dr. Michele Rondinone, el Dr. Alberto Mayol, José Ramón Gisbert, Alejandro Moraleda, Sara Hernández, Jose Antonio Palazón, Hector Moner, Ernesto Armada, David de la Fuente y Ramón Bauza, por su ayuda y compañerismo tanto dentro como fuera de la universidad, así como a los técnicos Juan Luis Maestre y Rubén Martínez, al resto de miembros del departamento de Ingeniería de Comunicaciones y al resto de personal de la Universidad Miguel Hernández de Elche.

Por otro lado, me gustaría agradecer a la Dr. Elisabeth Uhlemann y a los miembros de la división *Networked and Embedded Systems* de la Mälardalen University de Västerås por acogerme en el corto pero intenso periodo de estancia.

Finalmente me gustaría dar las gracias a mi familia y amigos, a los que están y a los que nos han dejado. Tendría que dar las gracias a tanto familiar y amigo que me es imposible nombraros a todos. Gracias a mis padres Jose Antonio y Trinidad por haberme inculcado valores morales como el respeto, la amistad, la honestidad, la justicia o la humildad. A mis hermanas Sandra y Maria José por estar siempre ahí. A mis abuelos, tíos, primos y sobrinos por compartir tantos buenos momentos conmigo. Gracias a toda mi familia política por haberme acogido como uno más. Y a Fina Pilar por permitirme compartir cada día a tu lado, por complementarme, por afrontar juntos los retos y las etapas de la vida, y por desprender tanto amor hacia mí. Gracias.





# Contenidos

<b>Lista de Publicaciones .....</b>	<b>xvii</b>
<b>Lista de Acrónimos.....</b>	<b>xix</b>
<b>Lista de Figuras .....</b>	<b>xxi</b>
<b>Lista de Tablas .....</b>	<b>xxix</b>
<b>1 Introducción .....</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivos y contribuciones de la tesis.....	4
1.2 Organización de la tesis .....	6
<b>2 WirelessHART .....</b>	<b>9</b>
2.1 Pila de protocolos y arquitectura.....	10
2.2 Capa física.....	13
2.3 Capa de enlace de datos.....	14
2.3.1 Subcapa de control de acceso al medio.....	15
2.3.2 Estructura funcional .....	19
2.3.3 Subcapa de control de enlace lógico .....	21
2.4 Capa de red.....	24
2.4.1 Estructura funcional .....	25
2.4.2 Servicio de transferencia de datos.....	28
2.5 Network Manager.....	29
2.5.1 Acceso de un nuevo dispositivo a la red.....	32
2.5.2 Descubrimiento de vecinos.....	36
<b>3 Impacto de la movilidad en redes inalámbricas industriales.....</b>	<b>39</b>
3.1 Estudio de dimensionado.....	40
3.1.1 Escenarios de evaluación.....	40
3.1.2 Parámetros y métricas.....	44

3.1.3	Resultados y conclusiones .....	48
3.2	Impacto de la movilidad en la fiabilidad <i>end-to-end</i> .....	53
3.2.1	Escenario y condiciones de evaluación .....	54
3.2.2	Evaluación .....	60
3.3	Conclusiones .....	64
<b>4</b>	<b>Descubrimiento de vecinos .....</b>	<b>67</b>
4.1	State of the art .....	69
4.2	Neighbor discovery proposals .....	71
4.2.1	Listen Advertise Network .....	71
4.2.2	Listen for Close Advertises .....	71
4.2.3	Listen Advertise Network for mobile devices .....	72
4.3	Metrics .....	73
4.4	Analytical performance modeling .....	74
4.4.1	System model .....	74
4.4.2	Discovery probability .....	76
4.4.3	Average time needed to detect a neighbor device .....	80
4.4.4	Efficiency .....	81
4.4.5	Energy consumption .....	83
4.5	Performance evaluation .....	84
4.5.1	Simulation platform .....	84
4.5.2	Evaluation scenarios .....	89
4.5.3	Validation of analytical models .....	90
4.5.4	Simulation results .....	91
4.6	Conclusions .....	97
<b>5</b>	<b>Asignación de enlaces de comunicación .....</b>	<b>99</b>
5.1	State of the art .....	100
5.2	Proposed link scheduling scheme .....	103
5.3	Metrics .....	105
5.4	Analytical performance modeling .....	107
5.4.1	Reliability .....	107
5.4.2	Latency .....	109
5.5	Performance evaluation .....	110
5.5.1	Validation of analytical expressions .....	113
5.5.2	Scenario 1 .....	113
5.5.3	Scenario 2 .....	118
5.5.4	Scenario 3 .....	120
5.5.5	Scenario 4 .....	124

5.6	Conclusions.....	125
<b>6</b>	<b>Selección de rutas y asignación coordinada de enlaces de comunicación .....</b>	<b>127</b>
6.1	Estado del arte.....	128
6.2	Impacto de la selección de la ruta.....	130
6.2.1	Fiabilidad <i>end-to-end</i> .....	131
6.2.2	Identificación de dispositivos retransmisores.....	133
6.2.3	Identificación computacionalmente eficiente de dispositivos retransmisores .....	138
6.2.4	Localización de dispositivos retransmisores .....	141
6.3	Reasignación de rutas y enlaces de comunicación .....	142
6.3.1	Reasignación de rutas y enlaces de comunicación en WirelessHART.....	142
6.3.2	Propuestas de algoritmos de reasignación en movilidad.....	145
6.3.3	Escenario y condiciones de evaluación.....	150
6.3.4	Resultados.....	153
6.4	Conclusiones.....	159
<b>7</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>161</b>
7.1	Impacto de la movilidad en redes inalámbricas industriales .....	162
7.2	Descubrimiento de vecinos .....	163
7.3	Asignación de enlaces de comunicación .....	164
7.4	Selección de rutas y asignación coordinada de enlaces de comunicación .....	164
7.5	Líneas futuras de investigación.....	166
<b>Anexo A.</b>	<b>Plataforma de simulación: descripción y validación.....</b>	<b>169</b>
a.	Propagation.....	170
b.	PHY layer .....	172
c.	MAC layer.....	181
d.	Network Manager.....	187
e.	Mobility.....	191
<b>Anexo B.</b>	<b>Artículo: Link Scheduling Scheme with Shared Links and Virtual Tokens for Industrial Wireless Sensor Networks .....</b>	<b>195</b>
	<b>Bibliografía .....</b>	<b>215</b>



# Lista de Publicaciones

Hasta la fecha, el trabajo realizado en la presente tesis ha generado las siguientes publicaciones:

Publicaciones en revistas internacionales con factor de impacto:

- S. Montero, J. Gozávez and M. Sepulcre, “Link Scheduling Scheme with Shared Links and Virtual Tokens for Industrial Wireless Sensor Networks”, *Mobile Networks & Applications*, 26 April 2016, doi: 10.1007/s11036-016-0727-3. Artículo publicado en revista incluida dentro del *Journal Citation Reports* de 2016 con factor de impacto 3.259 y contenida en el cuartil Q1.
- S. Montero, J. Gozávez and M. Sepulcre, “Neighbor Discovery for Industrial Wireless Sensor Networks with Mobile Nodes”. Publicación en segundo proceso de revisión en la revista *Computer Communications* incluida dentro del *Journal Citation Reports* de 2016 con factor de impacto 3.338 y contenida en el cuartil Q1.

Publicaciones en libro de actas de congresos nacionales e internacionales con proceso de revisión por pares sobre artículo completo y con ISBN:

- S. Montero and J. Gozávez, “LAN-ND, a New Neighbour Discovery Protocol for Mobile WirelessHART Industrial Networks” *Proceedings of the 18th IEEE International Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA 2013)*, 10-13 September 2013, Cagliari (Italia), doi: 10.1109/ETFA.2013.6647954.
- S. Montero, J. Gozávez y M. Sepulcre, “Asignación de Recursos Radio en Redes Industriales Inalámbricas Multisalto” *Libro de actas de las XII Jornadas de Ingeniería Telemática (JITEL 2015)*, 14-16 Octubre 2015, Palma de Mallorca.

- S. Montero y J. Gozávez, “Evaluación de la Fiabilidad end-to-end en Redes Inalámbricas Industriales multihop con Nodos Móviles” *Libro de actas del XXIX Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio (URSI 2014)*, 3-5 Septiembre 2014, Valencia.
- S. Montero, J. Gozávez y G. Prieto, “Descubrimiento de Vecinos en Redes inalámbricas con Nodos Móviles” *Libro de actas del XXVIII Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio (URSI 2013)*, 11-13 Septiembre 2013, Santiago de Compostela.

Otras publicaciones relacionadas publicadas en congresos nacionales e internacionales con proceso de revisión por pares sobre artículo completo y con ISBN:

- S. Montero, J. Gozávez, M. Sepulcre and 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)*, Krakow (Poland), 17-21 September 2012, doi: 10.1109/ETFA.2012.6489704.
- S. Montero, J. Gozávez, M. Sepulcre y G. Prieto “Efecto de la Movilidad en Redes Inalámbricas de Comunicaciones Industriales,” *Libro de actas del XXVII Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio (URSI 2012)*, 12-14 Septiembre 2012, Elche.
- S. Montero, J. Gozávez, M. Sepulcre y G. Prieto “Capacidad de Redes Inalámbricas de Comunicaciones Industriales considerando Nodos Móviles,” *Libro de actas del XXVII Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio (URSI 2012)*, 12-14 Septiembre 2012, Elche.

# Lista de Acrónimos

ACK	Acknowledgement
AES	Advanced Encryption Standard
ASN	Absolute Slot Number
AWGN	Additive White Gaussian Noise
B&B	Branch-and-Bound
BER	Bit Error Rate
BFS	Breath-First Search
CCA	Clear Channel Assessment
CCM	Combined counter with CBC-MAC
C-LLF	Conflict-aware Least Laxity First
CRC	Cyclic Redundancy Check
CSMA	Carrier Sense Medium Access
DLL	Data Link Layer
DLPDU	Data-Link Protocol Data Unit
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
EIRP	Effective Isotropic Radiated Power
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
EUI	Extended Unique Identifier
EUI-64	64-bit Extended Unique Identifier
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FH	Frequency Hopping
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
FoF	Factories of the Future
FSRF	Fastest Sample Rate First
HART	Highway Addressable Remote Transducer
HbH	Hop by Hop scheduling scheme
HCF	HART Communications Foundation

HTL	Hop To Live
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ISA	International Society of Automation
ISM	Industrial, Scientific and Medical
IWSN	Industrial Wireless Sensor Network
LAN	Listen Advertise Network
LANm	Listen Advertise Network for mobile devices
LCA	Listen for Close Advertisises
LIKUID	LIInK schedUllIng scheme with shareD links and virtual tokens
LLC	Logical Link Control
LOS	Line-Of-Sight
LSF	Large-Scale Fading
MAC	Medium Access Control
MIC	Message Integrity Code
NBC	Number of Bytes Consumed
NDP	Neighbor Discovery Protocol
NoRtx	No Retransmission scheduling scheme
NPDU	Network layer Protocol Data Unit
OBS	OBstructed line-of-Sight
O-QPSK	Offset-Quadrature Phase-Shift Keying
OSI	Open System Interconnection
PDR	Packet Delivery Ratio
RLS	Route and Link Selection for mobile IWSN
RLS2	Route and Link Selection for mobile IWSN with 2 links per hops
RLSS	Route and Link Selection for mobile IWSN with Shared links
RSS	Received Signal Strength
RSSI	Received Signal Strength Indicator
RTE	Retransmission afTER scheduling scheme
RWP	Random WayPoint
SINR	Signal to Interference and Noise Ratio
SNR	Signal-to-Noise Ratio
TDMA	Time Division Multiple Access
URA	Unnecessary Reception Attempts
WH	WirelessHART Neighbor Discovery Protocol
WH-RLS	WirelessHART Route and Link Selection



# Lista de Figuras

Figura 2-1. Comparación de capas OSI entre WirelessHART y HART.....	11
Figura 2-2. Estructura completa de una red WirelessHART.....	12
Figura 2-3. Canales de la banda de frecuencias ISM.....	13
Figura 2-4. Estructura del paquete a nivel físico.....	14
Figura 2-5. Salto de frecuencia en WirelessHART.....	15
Figura 2-6. Estructura de supertrama empleada en WirelessHART. ....	16
Figura 2-7. Estructura de <i>slot</i> empleado en WirelessHART. ....	18
Figura 2-8. Arquitectura de la subcapa control de acceso al medio en WirelessHART....	20
Figura 2-9. Estructura DLPDU. ....	22
Figura 2-10. Ejemplo de grafo entre el dispositivo A y el dispositivo F. ....	25
Figura 2-11. Arquitectura de la capa de red en WirelessHART.....	27
Figura 2-12. Estructura NPDU. ....	29
Figura 2-13. Secuencia de acceso de un nuevo dispositivo en WirelessHART. ....	35
Figura 2-14. Ejemplo del proceso de descubrimiento de vecinos en WirelessHART.....	37
Figura 2-15. Optimización de la red a partir del descubrimiento de nuevos vecinos. ....	37
Figura 3-1. Escenarios propuestos en [17] para evaluar el rendimiento de WirelessHART ante la presencia de dispositivos móviles.....	41
Figura 3-2. Casos propuestos en [17] para evaluar el rendimiento de WirelessHART ante la presencia de dispositivos móviles en el escenario 1.....	42
Figura 3-3. Asignación de enlaces de comunicación de gestión en la supertrama de gestión para el escenario 1 cuando el dispositivo móvil Z todavía no ha accedido a la red.....	45

Figura 3-4. Ilustración del tiempo de acceso de un nuevo dispositivo a la red y de parámetros relacionados con los casos de <i>reasociación</i> y <i>traspaso</i> en el escenario 1. ....	46
Figura 3-5. Tiempo de acceso (a) y Overhead de gestión (b) para los tres primeros escenarios evaluados [17]. ....	48
Figura 3-6. <i>Data_Ch_Usage</i> en función de $t_e$ para los diferentes casos bajo el escenario 1 [17]. ....	49
Figura 3-7. <i>Data_Ch_Usage</i> en función de $t_e$ para diferentes valores de $T_N$ en el escenario 1 [17]. ....	50
Figura 3-8. <i>Data_Ch_Usage</i> en función de $T_N$ para los diferentes escenarios cuando Z realiza una reasociación y $v=3\text{m/s}$ [17]. ....	51
Figura 3-9. Energía empleada por el dispositivo Z en función de $T_N$ (escenario 1, $v=1\text{m/s}$ y $R=200\text{m}$ ). ....	52
Figura 3-10. Despliegue de dispositivos estáticos y área de desplazamiento del dispositivo móvil. ....	54
Figura 3-11. Condiciones de propagación definidas en [26] para escenarios industriales. ....	56
Figura 3-12. PDR media en función de la distancia entre el emisor y el receptor ( $P_{Tx}=3\text{ dBm}$ , $N=-90\text{ dBm}$ y $B=133\text{ bytes}$ ). ....	56
Figura 3-13. Ejemplo de enlaces de comunicación utilizados por <i>Ruta</i> y <i>Salto</i> para la transmisión de los paquetes de datos entre el dispositivo móvil (origen) y el <i>Gateway</i> (destino). ....	58
Figura 3-14. Asignación de enlaces de comunicación realizada por las distintas técnicas ( <i>Ruta<sub>2+0</sub></i> , <i>Ruta<sub>2+1</sub></i> , <i>Salto<sub>2+0</sub></i> y <i>Salto<sub>2+1</sub></i> ) para las rutas de la Figura 3-13. ....	59
Figura 3-15. Ejemplo de análisis de fiabilidad <i>end-to-end</i> considerando $T_R=1\text{s}$ , $T_R=64\text{s}$ , $v=3\text{ m/s}$ , $B=133\text{ bytes}$ , $d=150\text{m}$ , y <i>Ruta<sub>2+1</sub></i> . Evolución temporal del dispositivo al que el dispositivo móvil está conectado (a). Evolución temporal de la fiabilidad <i>end-to-end</i> (b). Trayectoria seguida por el dispositivo móvil (c). ....	61
Figura 3-16. Fiabilidad <i>end-to-end</i> de las técnicas <i>Ruta<sub>2+1</sub></i> y <i>Ruta<sub>2+0</sub></i> en función de $v$ para distintos valores de $T_R$ bajo unas condiciones de propagación <i>LOS</i> con $d=150\text{m}$ y $B=26\text{ bytes}$ . ....	62

Figura 3-17. Fiabilidad <i>end-to-end</i> de las técnicas $\text{Salto}_{2+1}$ y $\text{Salto}_{2+0}$ en función de $v$ para distintos valores de $T_R$ bajo unas condiciones de propagación <i>LOS</i> con $d=150\text{m}$ y $B=26\text{ bytes}$ .....	62
Figura 3-18. Fiabilidad <i>end-to-end</i> de la técnica $\text{Ruta}_{2+1}$ en función de $v$ para distintos valores de $T_R$ bajo diferentes condiciones de propagación entre los dispositivos estáticos, $d=150\text{m}$ y $B=26\text{ bytes}$ .....	63
Figura 3-19. Fiabilidad <i>end-to-end</i> en función de $B$ bajo condiciones de propagación <i>LOS</i> , $d=100\text{m}$ , $v=3\text{ m/s}$ y $T_R=1\text{s}$ .....	63
Figura 3-20. Fiabilidad <i>end-to-end</i> en función de $d$ para diferentes condiciones de propagación, $B=26\text{ bytes}$ , $v=3\text{ m/s}$ y $T_R=1\text{s}$ .....	64
Figure 4-1. Block diagram of the simulation platform implemented. ....	85
Figure 4-2. Probability of device $i$ correctly receiving a <i>Keep-alive</i> DLPDU from $j$ as a function of $DLN_i$ in the presence of 4, 9, 16, 25 and 36 static devices when considering equidistant static devices in a square area. ....	89
Figure 4-3. Evaluation topologies. ....	90
Figure 4-4. Mobility use cases over the grid topology 2.....	90
Figure 4-5. Discovery probability ( $P_{disc}$ ) for grid topology 2 with $d=30\text{m}$ and $T_N=64\text{s}$ .....	91
Figure 4-6. Discovery probability ( $P_{disc}$ ) with $PDR_{min}=0.95$ , $d=60\text{m}$ and $M=1$ in grid topology 1. ....	91
Figure 4-7. $P_{conn}$ as a function of the speed of the mobile device ( $v$ ). Grid topology 1 with $d=60\text{m}$ and $PDR_{min}=0.95$ .....	93
Figure 4-8. $P_{conn}$ as a function of the speed of the mobile device ( $v$ ). Grid topology 1 with $d=30\text{m}$ and $PDR_{min}=0.95$ .....	94
Figure 4-9. $P_{conn}$ as a function of the speed of the mobile device ( $v$ ). Grid topology 3 with $T_N=64\text{s}$ and $d=30\text{m}$ . ....	94
Figure 4-10. Average <i>NBC</i> as a function of the elapsed time $t$ for different number of active frequency channels $C$ . ....	95
Figure 5-1. Centralized scheduling schemes.....	103
Figure 5-2. LIKUID's link scheduling for a path with 3 hops when $R$ is equal to 1, 2 and 3.....	104
Figure 5-3. Evaluation scenarios. ....	111

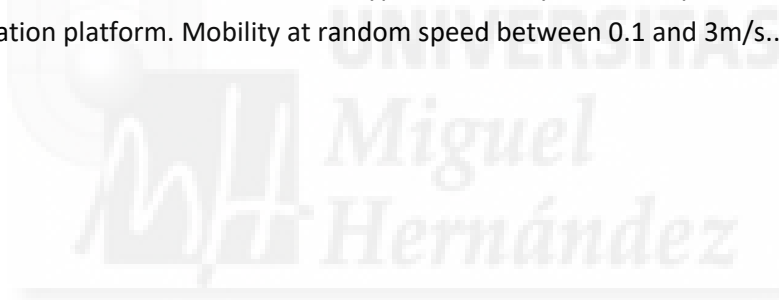
Figure 5-4. Reliability and latency as a function of the $PDR_i$ for scenario 1.....	115
Figure 5-5. Average percentage of links that have been utilized and Unnecessary Reception Attempts (URA) as a function of the $PDR_i$ for scenario 1.....	116
Figure 5-6. Total energy consumption and average energy consumed per message correctly received at the destination node as a function of the $PDR_i$ for scenario 1. ....	117
Figure 5-7. Reliability and latency as a function of the $PDR_i$ for scenario 2.....	118
Figure 5-8. Average percentage of links that have been utilized and Unnecessary Reception Attempts (URA) as a function of the $PDR_i$ for scenario 2.....	119
Figure 5-9. Total energy consumption and average energy consumed per message correctly received at the destination node as a function of the $PDR_i$ for scenario 2. ....	119
Figure 5-10. Results (average, 5th and 95th percentiles) obtained under scenario 4....	125
Figura 6-1. Alternativas de asignación de dos enlaces de comunicación para la transmisión de datos desde un mismo dispositivo móvil. ....	134
Figura 6-2. Área en la que se proporciona una fiabilidad <i>end-to-end</i> superior a una fiabilidad objetivo del 0.95 en función de la separación entre A y B normalizada por la distancia $d_{0.95,1}$ .....	135
Figura 6-3. Área en la que se proporciona una fiabilidad <i>end-to-end</i> superior a una fiabilidad objetivo del 0.95 en función de la separación entre los dispositivos retransmisores de las dos rutas desde el dispositivo móvil ( $L_A=1$ y $L_B=1$ ).....	136
Figura 6-4. Área en la que se proporciona una fiabilidad <i>end-to-end</i> superior a una fiabilidad objetivo del 0.99 en función de la separación entre A y B normalizada por la distancia $d_{0.99,1}$ .....	136
Figura 6-5. Área en la que se proporciona una fiabilidad <i>end-to-end</i> superior a una fiabilidad objetivo del 0.99 en función de la separación entre los dispositivos retransmisores de las dos rutas desde el dispositivo móvil ( $L_A=1$ y $L_B=1$ ).....	136
Figura 6-6. Área en la que se proporciona una fiabilidad <i>end-to-end</i> superior a una fiabilidad objetivo del 0.95 en función de la separación entre los dispositivos retransmisores de las dos rutas desde el dispositivo móvil ( $L_A=2$ y $L_B=1$ ).....	137

Figura 6-7. Área en la que se proporciona una fiabilidad <i>end-to-end</i> superior a una fiabilidad objetivo del 0.99 en función de la separación entre los dispositivos retransmisores de las dos rutas desde el dispositivo móvil ( $L_A=2$ y $L_B=1$ ). .....	137
Figura 6-8. Comparación del área en la que se proporciona una fiabilidad <i>end-to-end</i> superior a la fiabilidad objetivo (2 enlaces de comunicación por la ruta principal y 1 enlace de comunicación por la ruta secundaria). .....	139
Figura 6-9. Comparación del área en la que se proporciona una fiabilidad <i>end-to-end</i> superior a la fiabilidad objetivo (1 enlace de comunicación por la ruta principal y 1 enlace de comunicación por la ruta secundaria). .....	139
Figura 6-10. Comparación del área en la que se proporciona una fiabilidad <i>end-to-end</i> superior a la fiabilidad objetivo (2 enlaces de comunicación por la ruta principal y 2 enlaces de comunicación por la ruta secundaria). .....	140
Figura 6-11. Localización de los dispositivos retransmisores en el primer salto desde el dispositivo móvil cuando no se dispone de información de la movilidad del dispositivo (Situación 1) y cuando sí se dispone (Situación 2). .....	141
Figura 6-12. Ejemplo de asignación de rutas y enlaces de comunicación para el dispositivo M realizada en base a los requisitos de WirelessHART. ....	143
Figura 6-13. Asignación de rutas y enlaces de comunicación realizada con la técnica de referencia WH-RLS para diferentes posiciones del dispositivo M en el escenario de ejemplo. ....	144
Figura 6-14. Asignación de rutas y enlaces de comunicación realizada por RLS para las diferentes posiciones del dispositivo M en el escenario de ejemplo. ....	146
Figura 6-15. Asignación de rutas y enlaces de comunicación realizada por RLS2 para las diferentes posiciones del dispositivo M en el escenario de ejemplo. ....	147
Figura 6-16. Asignación de rutas y enlaces de comunicación realizada por WH-RLS, RLS, RLS2 y RLSS para el dispositivo M en un escenario de ejemplo. ....	149
Figura 6-17. Asignación de rutas y enlaces de comunicación realizada por RLSS para las diferentes posiciones del dispositivo M en el escenario 1. ....	149
Figura 6-18. Despliegues de dispositivos estáticos y área de desplazamiento del dispositivo móvil. ....	150
Figura 6-19. PDR en función de la distancia entre el emisor y el receptor para el caso <i>All topographies</i> cuando $P_{Tx}=3$ dBm, $N= -90$ dBm y $B= 133$ bytes. ....	152

Figura 6-20. Comparación del rendimiento obtenido por las técnicas WH-RLS, RLS, RLS2 y RLSS bajo el escenario 2 con $PDR_{F-GW}$ igual a 0.999.....	155
Figura 6-21. Comparación del rendimiento obtenido por las técnicas WH-RLS, RLS, RLS2 y RLSS bajo el escenario 3 con $PDR_{F-GW}$ igual a 0.999.....	156
Figura 6-22. Comparación del rendimiento obtenido por las técnicas WH-RLS, RLS, RLS2 y RLSS bajo el escenario 3 con $PDR_{F-GW}$ igual a 0.99.....	156
Figura 6-23. Comparación del número de reasignaciones realizadas por las técnicas WH-RLS, RLS, RLS2 y RLSS en función de $PDR_{F-GW}$ bajo el escenario 2. ....	158
Figura 6-24. Comparación del número de reasignaciones realizadas por las técnicas WH-RLS, RLS, RLS2 y RLSS en función del escenario considerado con $PDR_{F-GW}$ igual a 0.99. ....	158
Figura 6-25. Comparación del número total de reasignaciones realizadas por las técnicas WH-RLS, RLS, RLS2 y RLSS en función del número de dispositivos estáticos desplegados con $PDR_{F-GW}$ igual a 0.99. ....	158
Figure A-1. Diagram of the simulation platform implemented. ....	170
Figure A-2. Table I from [26] that shows parameters of non-fixed and fixed intercept one-slope models ( $d_0=15m$ ) for each LSF topography and frequency band.....	171
Figure A-3. Pathloss in dB as a function of the distance. This figure was published in [26] and represents the model for the different LSF topographies at 900MHz. [26] does not include a figure with results at 2.4GHz. ....	171
Figure A-4. Pathloss in dB as a function of the distance. The values are obtained using the simulation platform for the models corresponding to LSF topography 1 at 900MHz and All LSF topography at 2.4GHz.....	171
Figure A-5. Bit Error Rate model implemented in the simulation platform. ....	173
Figure A-6. Bit Error Rate model in IEEE 802.15.4-2006 [13].....	173
Figure A-7. PER model implemented. ....	173
Figure A-8. Radio specifications of the XDM2510H transceiver [41].....	173
Figure A-9. Table 34 of the WirelessHART standard (“Slot timing definitions and values”).....	174
Figure A-10. Figure 19 of the WirelessHART standard (“Slot timing details”).....	174
Figure A-11. “Normal operating conditions” of the XDM2510H transceiver [41]. ....	175

Figure A-12. “Current consumption” of the XDM2510H transceiver [41].	176
Figure A-13. Time evolution of the energy consumed by a device running the WirelessHART neighbor discovery protocol in the grid topology 2.	177
Figure A-14. Time evolution of the energy consumed by a device running the LAN neighbor discovery protocol in the grid topology 2.	178
Figure A-15. Time evolution of the energy consumed by a static device running the LANm neighbor discovery protocol in the grid topology 2.	179
Figure A-16. Time evolution of the energy consumed by a mobile device running the LANm neighbor discovery protocol in the grid topology 2.	179
Figure A-17. Time evolution of the energy consumed by a mobile device running the LCA neighbor discovery protocol in the grid topology 2.	180
Figure A-18. Tx, Rx and idle slots for 5 devices when implementing WH.	184
Figure A-19. Tx, Rx and idle slots for 5 devices when implementing LAN.	184
Figure A-20. Tx, Rx and idle slots for 5 devices when implementing LANm.	184
Figure A-21. Tx, Rx and idle slots for 5 devices when implementing LCA.	184
Figure A-22. Histogram of the random samples generated for the transmission of <i>Keep-alive</i> DLPDUs with the WirelessHART neighbor discovery protocol.	185
Figure A-23. Histogram of the time between consecutive transmissions of <i>Keep-alive</i> DLPDUs with the WirelessHART neighbor discovery protocol.	185
Figure A-24. Evolution of the number of devices that simultaneously transmit <i>Keep-alive</i> DLPDUs in the same <i>Discovery Link</i> with the WirelessHART neighbor discovery protocol (first 1000 <i>Discovery Links</i> ).	186
Figure A-25. Histogram of the devices that simultaneously transmit <i>Keep-alive</i> DLPDUs in the same <i>Discovery Link</i> with the WirelessHART neighbor discovery protocol.	186
Figure A-26. Time evolution of the number of neighbors using WH.	187
Figure A-27. Time evolution of the number of neighbors using LAN.	187
Figure A-28. Time evolution of the number of neighbors using LANm.	187
Figure A-29. Time evolution of the number of neighbors using LCA.	187
Figure A-30. Allocation of <i>Advertise Links</i> in LAN for 6 devices.	189
Figure A-31. Allocation of <i>Advertise Links</i> in LCA for 6 devices.	190

Figure A-32. Allocation of <i>Advertise Links</i> in LANm for 6 devices.....	191
Figure A-33. Validation of the Random Waypoint mobility model implemented in the simulation platform under topology 2 when the simulation lasts 3200s. Mobility at constant speed equal to 1m/s.....	192
Figure A-34. Validation of the Random Waypoint mobility model implemented in the simulation platform under topology 2 when the simulation lasts 3200s. Mobility at constant speed equal to 3m/s.....	192
Figure A-35. Validation of the Random Waypoint mobility model implemented in the simulation platform under topology 2 when the simulation lasts 3200s. Mobility at random speed between 0.1 and 3m/s.....	193
Figure A-36. Validation of the Random Waypoint mobility model implemented in the simulation platform under topology 2 when the simulation lasts 3200s. Mobility at random speed between 0.1 and 1m/s.....	193
Figure A-37. Validation of the Random Waypoint mobility model implemented in the simulation platform. Mobility at random speed between 0.1 and 3m/s.....	193





# Lista de Tablas

Tabla 2-1. Requisitos temporales de los parámetros del <i>slot</i> .....	18
Tabla 2-2. Responsabilidades del <i>Network Manager</i> . ....	30
Tabla 3-1. Número de enlaces de comunicación asignados a gestión ( <i>M</i> ) [17]. ....	45
Tabla 3-2. Probabilidad de detección entre los dispositivos Z y B durante $t_{eAB}$ [17]. ....	51
Tabla 3-3. Parámetros del modelo de propagación [26] bajo diferentes condiciones de propagación. ....	55
Table 4-1. Symbols and parameters. ....	75
Table 4-2. Time to detect a neighbor $t_{det}$ (s). ....	93
Table 4-3. Links for neighbor discovery per <i>Management Superframe</i> . ....	96
Table 4-4. Average energy consumed per device and per <i>Management Superframe</i> $E_d$ ( $\mu$ J).....	97
Table 5-1. Number of total assigned links as a function of the number of hops in the path. ....	114
Table 5-2. Blocked links ( $H=3$ ).....	117
Table 5-3. Blocked links ( $H=4$ ).....	120
Table 5-4. $PDR_{EZE}$ in scenario 3.....	121
Table 5-5. $D_{EZE}$ [links] in scenario 3. ....	121
Table 5-6. Average percentage of links that have been utilized in scenario 3. ....	122
Table 5-7. URA metric in scenario 3.....	123
Table 5-8. $E_{PMD}$ [ $\mu$ J] in scenario 3. ....	123

Tabla 6-1. Distancia  $d_{th\_1}$  en metros para diferentes valores de fiabilidad *end-to-end* objetivo y entornos de propagación. ....133

Table A-1. Energy consumption values considered in the simulation platform. ....175



# 1

## Introducción

La cuarta revolución industrial, también conocida como Industria 4.0 o Fábrica del Futuro (FoF, *Factories of the Future*), pretende aumentar la inteligencia y la flexibilidad de los procesos de fabricación, gracias al desarrollo de robots y sistemas cognitivos, y a la expansión de las redes y comunicaciones. La fabricación a gran escala de productos comenzó con la máquina de vapor, evolucionó con el desarrollo de las líneas de producción, y actualmente se basa en el uso intensivo de las tecnologías de la información y de la electrónica. En la cuarta revolución industrial se combinarán los métodos de producción actuales con tecnologías de información y comunicación de vanguardia para dar lugar a las denominadas fábricas inteligentes. En marco de la Industria 4.0, personas, máquinas, equipos, sistemas logísticos y productos se comunicarán y cooperarán entre sí para hacer el proceso de fabricación más flexible y eficiente.

Las redes de comunicaciones inalámbricas tendrán un papel fundamental en la creación de sistemas industriales cooperativos y cognitivos. Según un reciente estudio de mercado publicado en el primer trimestre de 2017 [1], se espera un crecimiento anual medio del mercado de las redes inalámbricas industriales de aproximadamente el 12.7% durante los próximos 6 años, lo que supondrá que en 2022 se habrá doblado el valor del mercado con respecto a 2016. Este crecimiento tiene su justificación en las

ventajas que este tipo de redes ofrecen frente a las redes cableadas tradicionales: (1) una mayor flexibilidad en el despliegue de dispositivos al no quedar limitados a las localizaciones accesibles mediante cables; (2) una reducción en el tiempo y el coste de despliegue y mantenimiento de la red al eliminar los cables de comunicación; (3) una mayor capacidad de reconfiguración al reducirse los cambios necesarios en el despliegue cuando se añaden dispositivos a la red o se cambia su ubicación; (4) una mayor flexibilidad en las comunicaciones al poder cambiar las rutas empleadas en la transmisión sin necesidad de desplegar nuevos cables de comunicación; y (5) la posibilidad de poder integrar dispositivos móviles [2]. Las redes inalámbricas industriales podrán además posibilitar nuevas aplicaciones, como la continua monitorización del estado de equipos y procesos críticos, una mayor seguridad laboral de los trabajadores, o el seguimiento de bienes en tiempo real [3].

Varias organizaciones internacionales y proyectos han analizado los requisitos de comunicación de las aplicaciones industriales, tanto de aplicaciones de automatización industrial, como de las aplicaciones de control de procesos. El ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) divide los sistemas de automatización industrial en tres clases principales (*manufacturing cell*, *factory hall*, y *plant level*) con diferentes requisitos para cada una: tasas de errores de paquetes inferiores a  $10^{-9}$ , y latencias de entre 5ms y 20ms con unos periodos de actualización de 50ms, 200ms, y 500ms, respectivamente [4]. En el marco del proyecto Kol [5], también se han analizado los requisitos de las comunicaciones inalámbricas para la automatización industrial, concluyendo que los requisitos de latencia generalmente están en un rango entre 1ms y 50ms, y las tasas de errores de paquetes entre  $10^{-6}$  y  $10^{-9}$  [6]. Por otro lado, tal y como se indica en [7], el control de procesos es generalmente utilizado para la monitorización periódica de fluidos, como por ejemplo, mediciones del nivel de aceite o la presión de gas en tanques de almacenamiento. Debido a la naturaleza no crítica de estas aplicaciones, los requisitos de latencia y las tasas de errores de paquetes de estas aplicaciones no son tan estrictos y pueden permitirse latencias de hasta 100ms.

A pesar del potencial de las redes inalámbricas para la fábrica del futuro, la sustitución del medio de comunicación cableado por un medio inalámbrico supone un importante reto para cumplir con los estrictos requisitos de fiabilidad y retardo de las aplicaciones a las que dan soporte las redes de comunicación industriales [8]. El entorno industrial está caracterizado habitualmente por condiciones de propagación hostiles (obstrucciones metálicas de gran tamaño, propagación multitrayecto, etc.) y posibles interferencias, que dificultan el establecimiento de enlaces de comunicación robustos.

Estos condicionantes, unidos a los estrictos requisitos de calidad de servicio que imponen las aplicaciones industriales, hacen que se necesiten redes de comunicaciones inalámbricas especialmente robustas y diseñadas de forma específica para el entorno industrial [9].

WirelessHART [10] e ISA100.11a [11] son dos de los estándares de comunicaciones inalámbricas industriales más utilizados actualmente. Ambos proporcionan soluciones tecnológicas expresamente desarrolladas para operar en entornos industriales y proporcionar elevados niveles de fiabilidad y robustez en las comunicaciones entre dispositivos [12]. Mientras el estándar WirelessHART fue publicado en 2007 por la HCF (*HART Communications Foundation*), el estándar ISA100.11a fue aprobado en 2009 por la ISA (*International Society of Automation*). A pesar de presentar ciertas diferencias, la mayoría de las funciones relacionadas con la comunicación inalámbrica son similares en WirelessHART e ISA100.11a. Ambos estándares están basados en la capa física del estándar IEEE 802.15.4-2006 [13], y comparten ciertos mecanismos y tecnologías fundamentales como, por ejemplo, un mecanismo de acceso al medio por división en tiempo (TDMA, *Time Division Multiple Access*) combinado con salto en frecuencia (FH, *Frequency Hopping*), una gestión centralizada de la red, y una arquitectura de red en malla [12]. Es de destacar también el estándar IEEE 802.15.4e [14], aprobado en 2012 por el IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*). Este estándar aplica las ideas previamente adoptadas por los estándares WirelessHART e ISA100.11a para mejorar la funcionalidad de la capa de acceso al medio del estándar IEEE 802.15.4-2006 [13], e incrementar su adopción por parte de la industria [15].

El desarrollo de los sistemas industriales cooperativos y cognitivos que caracterizarán la cuarta revolución industrial requerirá de redes inalámbricas industriales capaces de garantizar la fiabilidad y el retardo de las comunicaciones inalámbricas industriales en presencia también de dispositivos móviles [9][16]. Los retos derivados de la propagación e interferencia en entornos industriales, son aún más complejos cuando se consideran condiciones cambiantes por la movilidad de los dispositivos, y redes industriales con gestión centralizada de rutas multi-salto y enlaces de comunicación. La movilidad de los dispositivos puede resultar en frecuentes reconfiguraciones de las redes industriales inalámbricas cada vez que un dispositivo móvil cambie de dispositivos vecinos. Estas reconfiguraciones pueden afectar tanto a las rutas de comunicación entre dispositivos, como a los enlaces de comunicación para cada salto de una ruta multi-salto. El coste (tanto en *overhead* como en latencia o en pérdida de fiabilidad) puede resultar considerable si tenemos en cuenta que las redes inalámbricas industriales son

gestionadas de forma centralizada. Si bien esta gestión centralizada ofrece importantes ventajas para satisfacer los estrictos requisitos de las aplicaciones industriales cuando todos los dispositivos son estáticos, también presenta importantes retos si debe soportar la conexión de dispositivos móviles.

## 1.1 Objetivos y contribuciones de la tesis

El principal objetivo de la presente tesis doctoral es el estudio, diseño, desarrollo y evaluación de nuevos protocolos de comunicación enfocados a mejorar el funcionamiento de las redes inalámbricas industriales en presencia de dispositivos móviles. Dada su aceptación industrial, esta tesis doctoral ha considerado el estándar de comunicaciones industriales inalámbricas WirelessHART como referencia y punto de partida [10], aunque la mayor parte de los protocolos diseñados podrían adaptarse a los estándares ISA100.11a [11] e IEEE 802.15.4e [14].

El primer estudio realizado en el marco de esta tesis ha sido el análisis del impacto que la movilidad de ciertos dispositivos produce en el funcionamiento y rendimiento de redes inalámbricas industriales WirelessHART. Este estudio extiende las investigaciones iniciadas por el candidato en su Trabajo de Fin de Máster [17]. Esta evaluación del impacto de la movilidad ha permitido identificar algunos de los diferentes retos que han de ser investigados para mejorar el rendimiento de las redes inalámbricas industriales en general, y del estándar WirelessHART en particular, en presencia de dispositivos móviles. Estos retos son: el acceso de un dispositivo móvil a la red tras la pérdida de la conectividad con la misma; la detección de nuevos dispositivos vecinos; y la gestión dinámica de las rutas y los enlaces de comunicación. De los tres grandes retos identificados, la presente tesis doctoral ha abordado los dos retos considerados de mayor impacto y recorrido, esto es, la detección de nuevos dispositivos vecinos, y la gestión dinámica de los enlaces de comunicación y las rutas. A continuación se enumeran las principales contribuciones de esta tesis doctoral:

- Evaluación del impacto de la presencia de dispositivos móviles en el rendimiento de redes inalámbricas industriales como WirelessHART. Este estudio fue iniciado en el Trabajo de Fin de Máster, y ha sido completado en el marco de la presente tesis doctoral. Como resultado de esta evaluación, se han identificado los principales retos y líneas de investigación que han de ser abordados para mejorar el rendimiento de las redes inalámbricas industriales

en general, y del estándar WirelessHART en particular, en presencia de dispositivos móviles.

- Propuesta de tres nuevos protocolos de descubrimiento de vecinos que aplican mecanismos deterministas, y explotan información de la topología de la red y la naturaleza de los dispositivos (estáticos o móviles), para mejorar la capacidad de WirelessHART de mantener conectados a la red a los dispositivos móviles.
- Modelado analítico de los protocolos de descubrimiento de vecinos propuestos como herramienta para obtener unas primeras estimaciones de su rendimiento.
- Estudio comparativo de los protocolos de descubrimiento de vecinos propuestos con el actual protocolo incluido en el estándar WirelessHART. El estudio ha sido llevado a cabo mediante los modelos analíticos propuestos y a través de simulaciones.
- Propuesta de un nuevo protocolo de asignación de enlaces de comunicación (*link scheduling*) flexible que reduce el retardo de las comunicaciones y aumenta su fiabilidad en rutas de comunicación multi-salto. La propuesta se basa en el concepto de testigo virtual (*virtual token*) en enlaces de comunicación compartidos.
- Modelado analítico del protocolo de asignación de enlaces de comunicación propuesto como herramienta para obtener unas primeras estimaciones del rendimiento.
- Estudio comparativo del protocolo de asignación de enlaces de comunicación propuesto con dos protocolos de referencia existentes en la literatura. El estudio ha sido llevado a cabo mediante simulación y el modelo analítico propuesto.
- Estudio y análisis del impacto de la selección del primer salto en la comunicación del dispositivo móvil sobre el área en la cual es posible garantizar una fiabilidad superior a la fiabilidad objetivo predefinida.
- Estudio, análisis y propuesta de una metodología computacionalmente eficiente para la identificación de la separación entre dispositivos estáticos que conforman las dos rutas utilizadas por el dispositivo móvil.

- Estudio, análisis y propuesta de tres técnicas para la reasignación de enlaces de comunicación y rutas en presencia de dispositivos móviles cuando se requiere garantizar la fiabilidad objetivo marcada por las aplicaciones explotando aspectos relacionados con la diversidad espacial y temporal de las comunicaciones.

## 1.2 Organización de la tesis

El capítulo 2 ofrece una descripción detallada de las principales características y módulos que conforman el estándar de comunicaciones inalámbricas industriales WirelessHART [10]. El propósito de este capítulo es el de servir como referencia para comprender el funcionamiento de dicho estándar, puesto que ha sido utilizado como referencia a lo largo de la tesis. En este capítulo se incluye una descripción de las diferentes capas del modelo OSI (*Open System Interconnection*) que integra el estándar y de los diferentes elementos que forman parte de la arquitectura de una red WirelessHART. La descripción del estándar WirelessHART presentada en este segundo capítulo hace especial hincapié en aquellos aspectos relacionados con la presente tesis doctoral como es el gestor de red, el procedimiento de acceso de un nuevo dispositivo a la red, y el mecanismo de descubrimiento de vecinos.

El capítulo 3 resume en primer lugar las investigaciones realizadas durante el Trabajo de Fin de Máster [17] y sus principales conclusiones respecto al impacto que la movilidad produce en el funcionamiento de las redes inalámbricas industriales. En concreto, este primer estudio se centró en el impacto que la movilidad tiene sobre el uso de los canales de comunicación teniendo en cuenta los procedimientos y parámetros de gestión que integra el estándar WirelessHART. Este primer estudio ha sido extendido en el marco de la presente tesis doctoral mediante la evaluación del impacto de la movilidad en la fiabilidad *end-to-end* de las comunicaciones inalámbricas industriales. El estudio ha considerado de nuevo como base las redes inalámbricas industriales WirelessHART. Los resultados obtenidos en esta primera investigación permitieron identificar los retos existentes y las líneas de interés de investigación para poder soportar la movilidad de dispositivos a la vez que se garantizan los niveles de fiabilidad y retardo demandados por las aplicaciones industriales.

El capítulo 4 propone y evalúa tres nuevos protocolos de descubrimiento de vecinos que mejoran la capacidad de los dispositivos móviles de permanecer conectados a la red WirelessHART mientras se desplazan. Los protocolos de descubrimiento de vecinos



presentados en este capítulo aplican mecanismos deterministas para reducir el tiempo necesario para descubrir un nuevo vecino, mejorando considerablemente las prestaciones con respecto al protocolo de descubrimiento de vecinos definido en el estándar WirelessHART. Dos de los tres protocolos de descubrimiento de vecinos presentados explotan información de la topología de la red y la naturaleza de los dispositivos (estáticos o móviles) para mejorar la eficiencia en cuanto a la utilización de los enlaces de comunicación y el consumo de energía. Para obtener las primeras estimaciones del rendimiento de cada protocolo diseñado, y ayudar a comprender la influencia de los diferentes parámetros en su rendimiento, se ha desarrollado un modelo analítico que permite obtener la probabilidad de descubrimiento de vecinos, el tiempo medio necesario para detectar un vecino, la eficiencia en la utilización de los enlaces de comunicación, y el consumo de energía. Los protocolos propuestos han sido evaluados de forma exhaustiva mediante una herramienta de simulación desarrollada en el marco de esta tesis, que ha ayudado además a validar el modelo analítico desarrollado. Si bien los protocolos de descubrimiento de vecinos presentados en el capítulo 4 han sido diseñados y evaluados utilizando como base el estándar WirelessHART, éstos podrían ser fácilmente adaptados para su utilización en otros estándares inalámbricos industriales como son ISA100.11a [11] e IEEE 802.15.4e [14].

El capítulo 5 presenta un nuevo protocolo de asignación de enlaces de comunicación flexible que reduce el retardo de las comunicaciones y aumenta su fiabilidad en una ruta de múltiples saltos. Para ello, el protocolo propuesto utiliza enlaces de comunicación compartidos entre los dispositivos que forman parte de la ruta. El protocolo diseñado utiliza el mensaje transmitido como un testigo virtual para identificar qué dispositivo debe utilizar los enlaces de comunicación compartidos en cada instante de tiempo. De forma análoga al capítulo 4, se ha desarrollado un modelo analítico para obtener unas primeras estimaciones del rendimiento del protocolo de asignación de enlaces de comunicación propuesto en términos de fiabilidad y retardo *end-to-end*. Este modelo ha sido validado y utilizado junto con simulaciones para evaluar el rendimiento del protocolo de asignación de enlaces de comunicación propuesto y de los protocolos utilizados como referencia. La comparación realizada demuestra que el protocolo propuesto es capaz de mejorar los niveles de fiabilidad y retardo, así como la utilización de los enlaces de comunicación y el consumo de energía. Si bien el protocolo propuesto ha sido desarrollado y evaluado en el marco de las redes inalámbricas industriales, es importante destacar que podría ser utilizado en cualquier red inalámbrica que utilice un esquema TDMA con gestión centralizada, y cuyas transmisiones entre origen y destino requieran de múltiples saltos.

El capítulo 6 aborda de forma conjunta la selección de rutas y la asignación de enlaces de comunicación con el objetivo de reducir el número de reasignaciones necesarias en presencia de dispositivos móviles dado un nivel de fiabilidad mínimo objetivo. Para ello, este capítulo aborda en primer lugar el problema de la selección de los dispositivos que han de actuar como retransmisores en el primer salto de la ruta. La tesis estudia y analiza el impacto de dicha selección sobre el área en la cual es posible garantizar una fiabilidad superior a la fiabilidad objetivo predefinida. También se propone una metodología computacionalmente eficiente para la identificación de la separación entre dispositivos estáticos que conforman las dos rutas utilizadas por el dispositivo móvil. Además, se indica cómo se han de seleccionar los dispositivos estáticos a los que cada dispositivo móvil debe conectarse en el momento del establecimiento de una ruta multi-salto, dependiendo de si se dispone o no de información del movimiento y las zonas de desplazamiento del dispositivo móvil. Es importante destacar que el estándar WirelessHART propone el establecimiento de dos rutas multi-salto entre origen y destino (una primaria y otra secundaria) con el fin de mejorar la fiabilidad *end-to-end*. En este contexto, esta tesis propone también el concepto de reasignación de rutas *SOFT*, que a diferencia de una reasignación de rutas *HARD*, solo cambia una de las rutas asignadas entre un dispositivo móvil y el dispositivo destino cada vez que la ruta multi-salto debe reconfigurarse debido a un cambio de vecinos resultante de la movilidad de los dispositivos. A continuación, la tesis estudia cómo han de ser asignados los enlaces de comunicación en cada una de las rutas, y se proponen y evalúan diferentes alternativas cuando se requiere garantizar la fiabilidad objetivo marcada por las aplicaciones. Estas alternativas analizan la posibilidad de modificar los enlaces de comunicación asignados a cada salto de una ruta multi-salto, y la posibilidad de introducir cierta diversidad espacial al permitir utilizar un mismo enlace de comunicación para la transmisión entre el dispositivo móvil y varios dispositivos estáticos vecinos que permanecen a la escucha.

Por último, el capítulo 7 resume las principales conclusiones extraídas del presente trabajo, y discute algunas de las principales líneas de investigación futuras relacionadas.

La memoria incluye también dos apéndices. El primero de ellos presenta la herramienta de simulación que se ha desarrollado para evaluar y comparar los protocolos de descubrimiento de vecinos propuestos. El segundo anexo recoge la publicación que da acceso a presentar esta tesis bajo la modalidad de tesis doctorales con un conjunto de publicaciones, recogida en la normativa de estudios de doctorado de la Universidad Miguel Hernández de Elche.

# 2

## WirelessHART

Hasta la llegada del estándar WirelessHART, las comunicaciones en el entorno industrial para el control de procesos industriales se llevaban a cabo siguiendo el estándar HART (*Highway Addressable Remote Transducer*). HART fue concebido en 1986 por el HCF para la configuración remota y la supervisión de datos con instrumentos de campo en procesos industriales modulando digitalmente un lazo de corriente 4-20 mA a una velocidad de 1200 bps. En septiembre de 2007 el HCF aprobó la publicación de la especificación 7.0 [18] del estándar HART, la cual incluyó por primera vez el estándar WirelessHART como tecnología inalámbrica para el control de procesos industriales. Poco después, en Junio de 2008, el HCF aprobó la publicación de la especificación 7.1 [19] con importantes correcciones y aclaraciones con respecto a la especificación 7.0. Posteriormente, en abril de 2010, el estándar WirelessHART fue aprobado por la IEC (*International Electrotechnical Commission*) como un estándar internacional independiente IEC 62591 Ed. 1.0 [10], convirtiéndose en el primer estándar inalámbrico internacional para la automatización de procesos. En marzo de 2016, se publicó una revisión técnica del estándar, IEC 62591 Ed. 2.0 [20], la cual incluyó algunas aclaraciones, correcciones y actualizaciones con respecto a la primera edición. En la presente tesis doctoral se ha utilizado como referencia la primera edición del IEC 62591 [10], versión del estándar WirelessHART publicada en 2010, la cual se presenta de forma detallada en el presente capítulo. Para ello, en el apartado 2.1 se presenta la pila de protocolos y la

arquitectura de red del estándar WirelessHART. En los apartados 2.2, 2.3 y 2.4 se explica en detalle las características de la capa física, la capa de enlace de datos y la capa de red, respectivamente. La configuración de cada capa de la pila de protocolos de cada dispositivo de la red es realizada por el *Network Manager* o *Gestor de Red*, el cual es presentado en el apartado 2.5 al representar un papel esencial en una red WirelessHART.

### 2.1 Pila de protocolos y arquitectura

WirelessHART abarca las 3 capas inferiores del modelo OSI: la capa física, la capa de enlace de datos y la capa de red. La Figura 2-1 muestra la estructura de capas de WirelessHART y las compara con HART. En la capa física, WirelessHART está basado en el estándar IEEE 802.15.4-2006 [13] operando en la banda de frecuencias ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) de 2.4GHz. Esta banda de frecuencias de uso sin licencia es utilizada también por otras tecnologías inalámbricas, como WIFI, Bluetooth y ZigBee. En la capa de enlace de datos, WirelessHART utiliza un esquema basado en TDMA y FDMA (*Frequency Division Multiple Access*), de forma que el acceso al medio se estructura en *slots* o ventanas temporales de 10ms y el sistema utiliza múltiples canales en frecuencia dentro de la banda de frecuencias ISM. Además, WirelessHART también utiliza FHSS (*Frequency Hopping Spread Spectrum*) para que las sucesivas transmisiones de un mismo dispositivo se realicen en canales de frecuencia diferentes, y con ello reducir el efecto negativo que las interferencias podrían producir en los distintos canales. A nivel de red, WirelessHART utiliza una topología de red en malla, en la que las comunicaciones entre los dispositivos origen y destino puede realizarse de manera directa si ambos dispositivos se encuentran dentro del rango de cobertura, o utilizando uno o varios dispositivos intermedios como retransmisores en el caso de que no se tenga conectividad directa. Para aumentar la fiabilidad *end-to-end*, WirelessHART contempla a nivel de red el empleo de grafos con rutas redundantes. En este contexto, un grafo es un subconjunto de enlaces de comunicación directos y de dispositivos que proporcionan rutas de comunicación redundantes entre un dispositivo origen y un dispositivo de destino. En este punto, es importante destacar que WirelessHART es un sistema de comunicaciones centralizado en el acceso al medio (capa de enlace de datos) y el enrutamiento (capa de red), tal y como se explica a continuación.

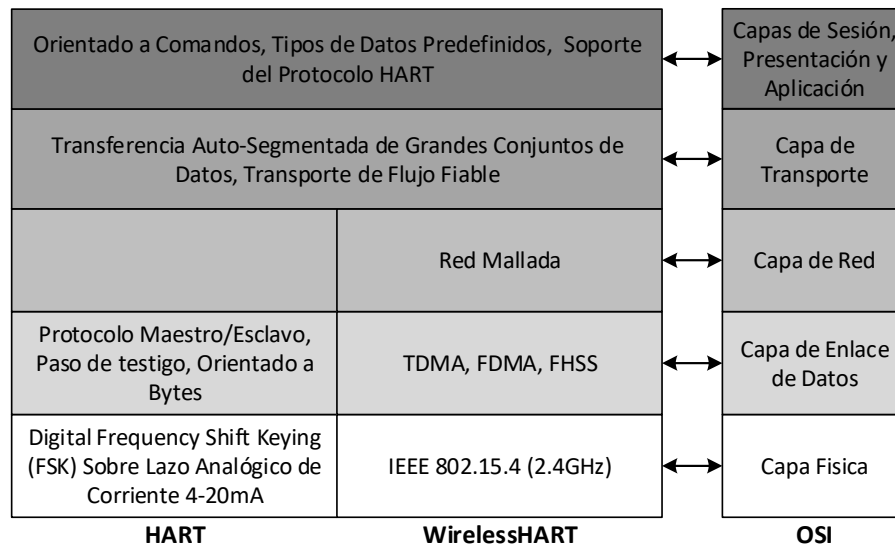


Figura 2-1. Comparación de capas OSI entre WirelessHART y HART.

La arquitectura de red WirelessHART soporta diferentes tipos de dispositivos (Figura 2-2). El *Network Manager* es el dispositivo gestor de la red. Se encarga de gestionar y configurar de forma centralizada las comunicaciones a nivel de enlace de datos y red entre los dispositivos de la red, asignando los enlaces de comunicación y creando las rutas para la comunicación entre los diferentes dispositivos. El *Network Manager* es el encargado, entre otras funciones, de gestionar el acceso de nuevos dispositivos a la red. Para llevar a cabo este proceso, un dispositivo que desea acceder a la red ha de enviar una solicitud al *Network Manager*, quien ha de determinar si le concede o no el acceso antes de proceder a su configuración. El *Network Manager* es además el dispositivo que gestiona el proceso de descubrimiento de vecinos. Este proceso es necesario para que los dispositivos de la red puedan actualizar la información relativa a los dispositivos vecinos. Dicha información posteriormente es enviada al *Network Manager* a través de *Health Reports*, y utilizada por éste para configurar y optimizar la red. Los *Health Reports* son paquetes enviados por los dispositivos de la red que contienen información de su estado operacional e información de la calidad de los enlaces de comunicación con los dispositivos vecinos. El *Network manager* no tiene habitualmente una interfaz de comunicaciones inalámbrica para la comunicación con los dispositivos de la red, sino que utiliza para ello los dispositivos *Gateway* o pasarela, tal y como se puede observar en la Figura 2-2.

El *Security Manager* o gestor de seguridad de la red es el responsable de la generación, distribución y mantenimiento de las claves de encriptación empleadas por los dispositivos de la red en todas las transmisiones.

Los *WirelessHART Field Devices* son los dispositivos que forman la red y que, en definitiva, interconectan a los elementos a monitorizar o controlar. Para incluir en la red a un dispositivo *HART Field Device*, se necesita un adaptador inalámbrico que implemente WirelessHART para comunicarse con el resto de dispositivos de forma inalámbrica.

Los *Wireless Handheld* son dispositivos habilitados para configurar los *WirelessHART Field Devices* cuando éstos todavía no están correctamente desplegados dentro de la red, así como para ejecutar diagnósticos y realizar calibraciones en los dispositivos una vez éstos están correctamente desplegados en la red. Así, estos dispositivos, son herramientas que permiten la configuración y el mantenimiento de los dispositivos desplegados. Es importante destacar que los *Wireless Handheld* no pueden considerarse dispositivos móviles de la red al no poder comunicarse con el *Network Manager* ni poder reportarle datos utilizando el resto de dispositivos desplegados en la red.

El *Host Application* representa el programa software utilizado por el centro de control para traducir la información recibida de los dispositivos de campo a un formato que pueda ser utilizado por el operador para su visualización y control.

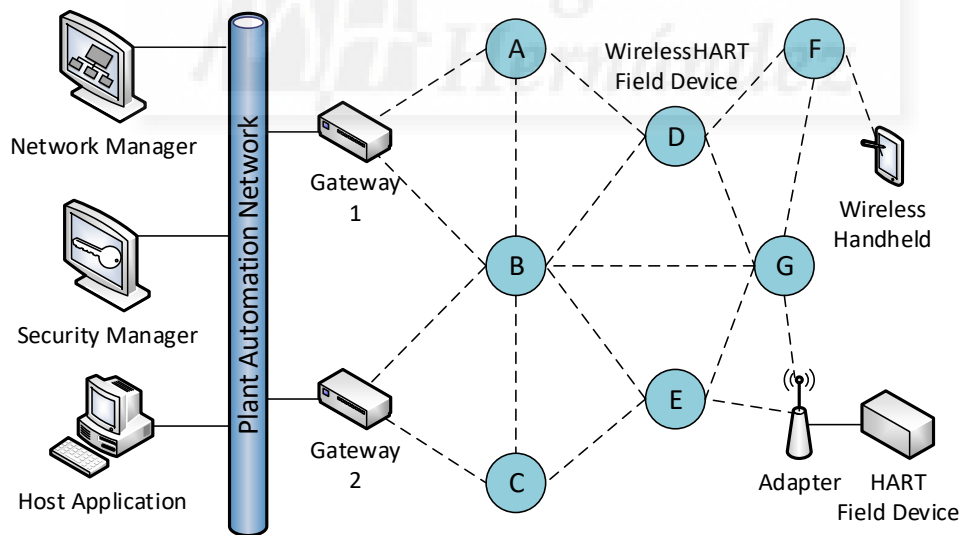


Figura 2-2. Estructura completa de una red WirelessHART.

## 2.2 Capa física

En el estándar WirelessHART, la capa física define las características de la interfaz radio utilizada en las comunicaciones, tales como la modulación y la banda de frecuencias. WirelessHART se basa en la capa física definida en el estándar IEEE 802.15.4-2006 [13], operando en la banda de frecuencias libre de licencia ISM de 2.4GHz. La banda de frecuencias de 2.4GHz está dividida en distintos canales de 2MHz numerados del 11 al 26 con una separación de 5MHz entre dos canales adyacentes y comprende el rango de frecuencias entre los 2400MHz y los 2483.5MHz, tal y como se muestra en la Figura 2-3. Es importante reseñar que el canal 26 (canal representado con un gris más oscuro en la Figura 2-3) no es de uso libre en ciertos países y por ello su utilización no está habilitada en el estándar WirelessHART. El resto de canales pueden ser utilizados al mismo tiempo por distintos dispositivos, lo que permite tener hasta 15 comunicaciones en 15 canales diferentes en un mismo intervalo de tiempo. WirelessHART utiliza salto de canal a nivel de *slot*, esto es, utiliza FHSS, de modo que el canal físico utilizado es cambiado en la transmisión de cada paquete. El objetivo es combatir los efectos producidos por desvanecimientos asociados a múltiples trayectos al variarse el canal de frecuencia utilizado en la comunicación entre los diferentes dispositivos.

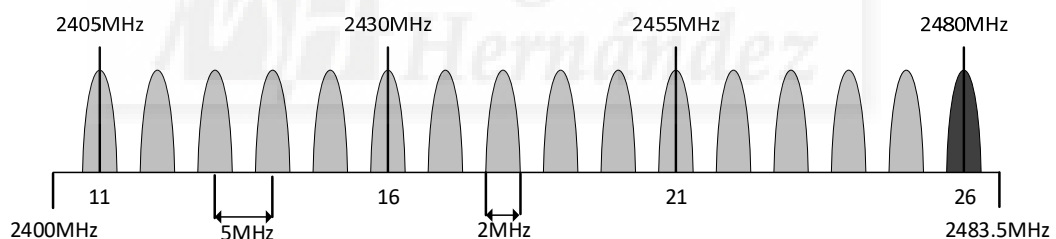


Figura 2-3. Canales de la banda de frecuencias ISM.

La capa física de WirelessHART también define la potencia de transmisión que puede ser utilizada durante la transmisión radio. Todos los transceptores radio utilizados en el estándar WirelessHART han de ser capaces de proporcionar una EIRP (*Effective Isotropic Radiated Power*) nominal de 10dBm (10mW) y han de ser poder ser configurables por el *Network Manager* desde -10dBm hasta +10dBm. El transceptor radio utilizado en los dispositivos WirelessHART ha de cumplir además con el estándar IEEE 802.15.4-2006 [13]. WirelessHART emplea una modulación O-QPSK (*Offset-Quadrature Phase-Shift Keying*) con 16 símbolos distintos en la que cada símbolo transmitido representa 4 bits de la señal original. WirelessHART emplea también la técnica de espectro ensanchado por secuencia directa o DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*), definida en el estándar

IEEE 802.15.4-2006 [13], para transformar la señal original y que la energía de la señal transmitida se disperse ocupando un mayor ancho de banda. Cada bit de la señal original es multiplicado por una secuencia preestablecida de 8 chips. La tasa de transmisión establecida para las radios IEEE 802.15.4-2006 [13] es de 2000kchip/s, lo que supone una tasa de transmisión de 250kbits/s.

El estándar WirelessHART también adopta del estándar IEEE 802.15.4-2006 [13] la estructura del paquete enviado a nivel físico, cuyo tamaño máximo es de 133 bytes. La Figura 2-4 muestra la estructura a nivel físico del paquete enviado en WirelessHART. Esta estructura contiene un *Preamble* de 4 bytes (todos a cero) y un *Delimiter* de 1 byte con el valor 0xA7 que son utilizados como secuencia de sincronización a nivel físico y un campo *Frame Length* de 1 byte que contiene la longitud de los datos provenientes de la capa de enlace de datos. Tras los tres campos de la capa física se incorpora la información encapsulada proveniente de la capa de enlace de datos.

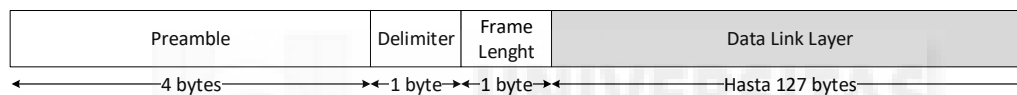


Figura 2-4. Estructura del paquete a nivel físico.

### 2.3 Capa de enlace de datos

La capa de enlace de datos es la segunda capa del modelo OSI y se encarga de proporcionar un medio confiable para transferir datos entre los dispositivos a través de un enlace físico. Esta capa se encarga del acceso al medio, del direccionamiento físico, de la detección de errores producidos en la capa física, de la distribución ordenada de la información y del control del flujo. WirelessHART subdivide esta capa en dos subcapas, la subcapa de control de enlace lógico (LLC, *Logical Link Control*) y la subcapa de control de acceso al medio (MAC, *Medium Access Control*). La subcapa de control de enlace lógico incluye la definición de los requisitos del formato de las tramas, de la estructura de las direcciones de los dispositivos, los servicios de seguridad utilizados para la integridad del mensaje y la codificación utilizada para la detección de errores. La subcapa de control de acceso al medio es la capa más baja dentro de la capa de enlace de datos y especifica cómo los dispositivos acceden al medio físico, esto es, define cuando se permite a un dispositivo transmitir un paquete, a la vez que se garantiza que las transmisiones de los dispositivos se producen de manera ordenada.



### 2.3.1 Subcapa de control de acceso al medio

A nivel de control de acceso al medio, el estándar WirelessHART incorpora el mecanismo de acceso múltiple por división en el tiempo o TDMA. Todos los dispositivos de la red se comunican en intervalos de tiempo denominados *slots* cuya duración temporal es fija e igual a 10 milisegundos. El uso de TDMA ayuda al sistema a minimizar las colisiones y a reducir el consumo de energía de los dispositivos. Esto es así especialmente gracias a que es el *Network Manager* el encargado de gestionar y asignar los *slots* a cada uno de los dispositivos de la red. WirelessHART incorpora también el mecanismo de acceso al medio por división de frecuencia o FDMA lo que permite la transmisión simultánea de varios dispositivos en un mismo *slot* pero en canales de frecuencia distintos. De esta forma, en WirelessHART los recursos radio se dividen *slots* y canales de frecuencia (*links* o enlaces de comunicación) tal y como se muestra en la Figura 2-5. El estándar WirelessHART también aplica la técnica de espectro ensanchado por salto de frecuencia o FHSS a alto nivel. En el lugar de realizar un salto de canal después de la transmisión de cada bit, en WirelessHART el salto de canal que se realiza en cada *slot* en base a un patrón previamente configurado, tal y como se muestra en la Figura 2-5, lo que permite reducir las interferencias al evitarse utilizar siempre el mismo canal de frecuencia. Así, las interferencias en un canal de frecuencia afectan a un reducido número de transmisiones, y en ningún caso afecta a dos transmisiones consecutivas.

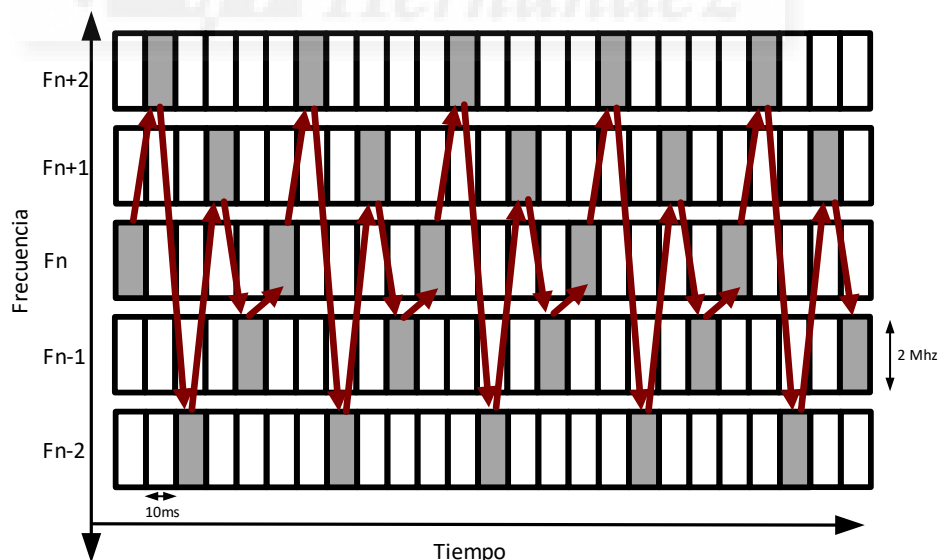


Figura 2-5. Salto de frecuencia en WirelessHART.

WirelessHART introduce el concepto de supertrama como la agrupación de una secuencia de *slots* consecutivos, tal y como se muestra en la Figura 2-6 para un único

canal de frecuencia. Una supertrama se repite periódicamente, con su longitud total de *slots* como período de dicha supertrama. En WirelessHART pueden coexistir diferentes supertramas con una periodicidad dependiente de la tasa de envío de los datos. Todas las supertramas de la red WirelessHART se repiten a lo largo del tiempo. Los *slots* están numerados mediante el número de *slot* absoluto (ASN, *Absolute Slot Number*) el cual se inicia con un valor igual a 0 en el momento de creación de la red y se incrementa en una unidad cada *slot* de 10ms. En WirelessHART, cada enlace de comunicación o *link* es descrito por un vector: {*Id Supertrama*, *Índice*, *Offset de Canal*} donde *Id supertrama* es la identificación de la supertrama específica utilizada; *Índice* es el índice del *slot* dentro de la supertrama; *Offset de Canal* proporciona el canal lógico que ha de ser utilizado en la comunicación. La *Id supertrama* y el *Índice* permiten identificar el *slot* concreto en el que se realiza la comunicación. El *Offset de Canal* permite identificar el canal de frecuencia concreto en el que se realiza la comunicación. Para un determinado *slot* y *Offset\_Canal*, el canal de frecuencia real a utilizar se determina a partir de la siguiente expresión:

$$Canal\_Actual = (Offset\_Canal + ASN) \pmod{Numero\_Canales} \quad (2-1)$$

donde *Canal\_Actual* es utilizado como el índice en la tabla de canales activos para obtener el número de canal físico real, y *Numero\_Canales* es el número de entradas en la tabla de canales activos. La tabla de canales contiene una secuencia pseudo-aleatoria de todos los canales disponibles. Puesto que el ASN aumenta constantemente, el mismo *Offset\_Canal* puede corresponder a diferentes canales físicos en diferentes *slots*, ofreciéndose diversidad de frecuencia en un mismo enlace de comunicación.

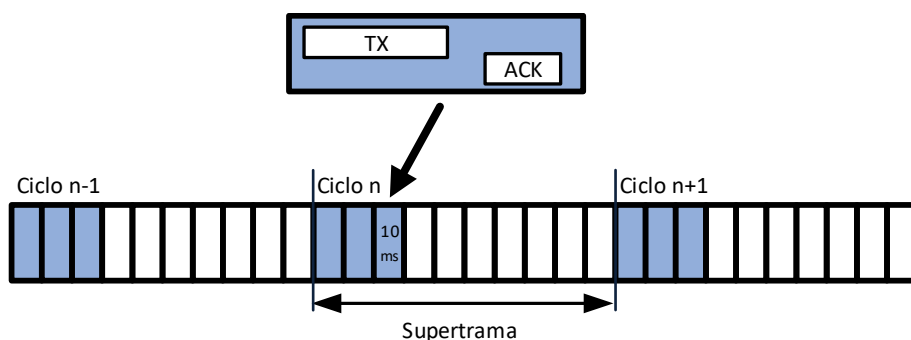


Figura 2-6. Estructura de supertrama empleada en WirelessHART.

WirelessHART introduce la posibilidad de crear una lista negra de canales (*blacklist channel*) en la que se pueden indicar aquellos canales afectados por interferencias constantes. Cada dispositivo mantiene una tabla con la lista de canales activos, que debido al uso de la lista negra puede tener menos de 15 entradas. Con ello se consigue

evitar el uso de canales que, por ejemplo, están siendo usados por otros sistemas como WiFi o Bluetooth, por presentar elevados niveles de interferencia. WirelessHART también hace uso del mecanismo CSMA (*Carrier Sense Medium Access*) para el acceso al medio en ciertos *slots* compartidos por más de un dispositivo que se encuentran en el mismo canal de frecuencia. En este caso, los dispositivos escuchan el canal para determinar si está libre antes de transmitir. En caso de que el canal esté ocupado el dispositivo desestima la transmisión durante ese *slot* y lo vuelve a intentar en el siguiente *slot* compartido.

Para sincronizar la transmisión y la recepción entre dos dispositivos WirelessHART, se requiere definir con precisión la estructura de tiempos dentro de cada *slot*. La Figura 2-7 muestra la estructura de tiempos del *slot* empleado para la transmisión y recepción en WirelessHART. La Figura 2-7a muestra los periodos de tiempo en el emisor del paquete y la Figura 2-7b muestra los periodos de tiempo en el receptor del paquete. Debido a imprecisiones en el proceso de sincronización ocasionadas por diferentes retardos en los relojes de ambos dispositivos, es posible que el instante del inicio del *slot* sea ligeramente diferente en el emisor y el receptor del paquete. Por este motivo se definen ciertos periodos de guarda que permiten una correcta comunicación entre los dispositivos aunque no estén perfectamente sincronizados. El diagrama de la Figura 2-7 muestra un ejemplo en el que el *slot* empieza en un instante de tiempo posterior en el dispositivo destino del paquete. Para transmitir un paquete, el emisor ha de esperar un tiempo  $T_{sCCAOffset}$  desde el inicio del *slot* antes de comprobar si el canal está libre durante un tiempo  $T_{sCCA}$ . Si el canal está ocupado, el emisor no realiza ninguna acción más en este *slot* y esperará hasta el siguiente *slot*. Si el canal está libre, el emisor cambia al modo de transmisión en un intervalo de tiempo equivalente a  $T_{sRxTx}$ . Una vez ha cambiado la radio a modo transmisión, empieza a transmitir el paquete durante  $T_{sMaxPacket}$ . Cuando termina de transmitirlo espera un tiempo  $T_{sRxAckDelay}$  y comienza a escuchar el paquete de confirmación (ACK, *Acknowledgement*). Si durante un tiempo equivalente a  $T_{sAckWait}$  no se recibe la confirmación, se considera que la transmisión ha fallado y se actúa acorde con esta situación. Dependiendo del tipo de paquete se descarta o se vuelve a transmitir en un nuevo *slot*. En el caso de que el dispositivo transmisor no reciba el paquete de confirmación del dispositivo receptor en repetidas ocasiones, se podría actualizar el estado de la conexión entre los dos dispositivos como caída. Para recibir un paquete, el receptor debe esperar un periodo de tiempo  $T_{sRxOffset}$  desde el inicio del *slot* antes de empezar a escuchar en el canal designado para la transmisión. Si ningún paquete ha empezado a ser transmitido dentro del periodo de tiempo  $T_{sRxWait}$ , se considera que el *slot* no está siendo usado para una

transmisión y el receptor desconecta la radio en este *slot*. En caso de que sí haya empezado la recepción del paquete, el paquete es recibido y procesado. Una vez que el paquete ha sido recibido, el receptor prepara el ACK dentro del periodo de tiempo  $TsTxAckDelay$  y lo transmite al dispositivo origen de la transmisión. Los valores temporales de transmisión y recepción dentro de un *slot* se muestran en la Tabla 2-1, siendo necesario que todas las transmisiones cumplan con estos valores de tiempo.

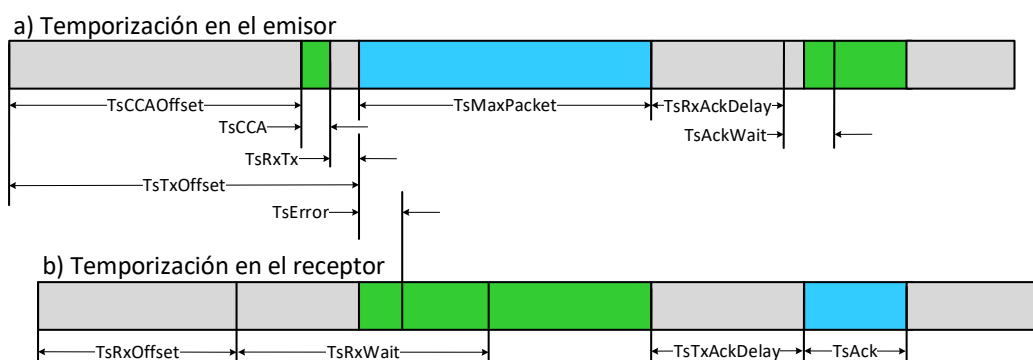


Figura 2-7. Estructura de *slot* empleado en WirelessHART.

Tabla 2-1. Requisitos temporales de los parámetros del *slot*.

Parámetro	Definición	Valor requerido
$TsTxOffset$	Intervalo desde el comienzo del <i>slot</i> hasta el inicio de la transmisión del preámbulo.	2120 $\mu\text{s} \pm 100 \mu\text{s}$
$TsTxAckDelay$	Intervalo de tiempo desde el final del mensaje hasta el inicio de la transmisión del ACK.	1000 $\mu\text{s} \pm 100 \mu\text{s}$
$TsRxWait$	Tiempo mínimo de espera para el inicio del mensaje.	2200 $\mu\text{s} \pm 100 \mu\text{s}$
$TsRxOffset$	Retardo inicial con respecto al inicio del <i>slot</i> en el que se ha de iniciar el transceptor radio en recepción.	1120 $\mu\text{s} \pm 100 \mu\text{s}$
$TsRxAckDelay$	Intervalo de tiempo entre el final del mensaje y el instante en el que se deber encender la radio para recibir el ACK.	800 $\mu\text{s} \pm 100 \mu\text{s}$
$TsMaxPacket$	Tiempo necesario para transmitir un paquete de 133 bytes.	4256 $\mu\text{s}$
$TsCCAOffset$	Intervalo desde el comienzo del <i>slot</i> hasta el CCA ( <i>Clear Channel Assessment</i> ).	1800 $\mu\text{s} \pm 100 \mu\text{s}$
$TsCCA$	Tiempo para realizar el CCA (8 símbolos).	128 $\mu\text{s}$
$TsAckWait$	Tiempo mínimo para esperar el comienzo de un ACK.	400 $\mu\text{s} \pm 100 \mu\text{s}$
$TsAck$	Tiempo para transmitir un ACK (26 octetos).	832 $\mu\text{s}$

Para el correcto funcionamiento del esquema TDMA se requiere que todos los dispositivos de la red estén sincronizados. Con este objetivo, el *Network Manager* establece un árbol de sincronización que parte del *Gateway*. Si el emisor del paquete es el dispositivo padre en el árbol de sincronización<sup>1</sup>, el receptor ajusta su reloj basándose en la diferencia entre el tiempo esperado de inicio de recepción del paquete y el tiempo en que se ha recibido (*TsError*). De este modo el siguiente *slot* estará sincronizado.

### 2.3.2 Estructura funcional

En este apartado se presenta la estructura funcional de la subcapa de control de acceso al medio definida en WirelessHART y que han de implementar los dispositivos de la red. La Figura 2-8 muestra la arquitectura de la subcapa de control de acceso al medio en WirelessHART. Entre los módulos que forman parte de la capa de control de acceso al medio, se encuentran definidas una serie de tablas que controlan las actividades de comunicación, y diversos módulos que gestionan la transmisión y recepción de información. Las tablas que controlan las actividades de comunicación a nivel de la subcapa de control de acceso al medio son:

- La tabla de supertramas contiene las características de las múltiples supertramas que están activas al mismo tiempo en un dispositivo. Esta tabla la programa el *Network Manager* en cada dispositivo. Algunos de sus campos son: el identificador de la supertrama, el número de *slots* de la supertrama, la lista de enlaces de comunicación en la supertrama y un *flag* que indica si la supertrama está o no activa.
- La tabla de enlaces de comunicación contiene los múltiples enlaces de comunicación que pueden ser configurados dentro de cada supertrama para especificar la comunicación con un determinado dispositivo vecino o para realizar una comunicación *broadcast*. Esta tabla la programa el *Network Manager* en cada dispositivo. Algunos de sus campos son: el identificador del enlace, el tipo de enlace, si el enlace está asignado a transmisión o a recepción, el *slot* dentro de la supertrama asignado al enlace, y el *offset* del canal de frecuencia utilizado para el salto en frecuencia.

---

<sup>1</sup> En una topología en árbol, la relación entre dos dispositivos conectados directamente por una rama se denomina padre/hijo. Un dispositivo padre es aquel con el que se está conectado directamente cuando se acerca a la raíz. En el caso del árbol de sincronización, la raíz del árbol es el *Gateway*.

- La tabla de vecinos contiene una lista de todos los dispositivos con los que el dispositivo es capaz de comunicarse directamente. Esta tabla la actualiza cada dispositivo. Algunos de sus campos son: el identificador único del dispositivo, el estado, el instante de la última comunicación, el nivel de señal medio, y el número de paquetes transmitidos y recibidos.
- La tabla de grafos (rutas) contiene una lista de todos los grafos utilizados para redirigir los mensajes desde el origen al destinatario. Al ser una tabla de capa de enlace de datos, los dispositivos no conocen la ruta completa, por lo que esta tabla contiene el siguiente salto del mensaje para redirigir el mensaje hasta el destinatario. Esta tabla la programa el *Network Manager* en cada dispositivo. Algunos de sus campos son: el identificador del grafo y la lista de vecinos que actúan como el siguiente salto hacia el destino.

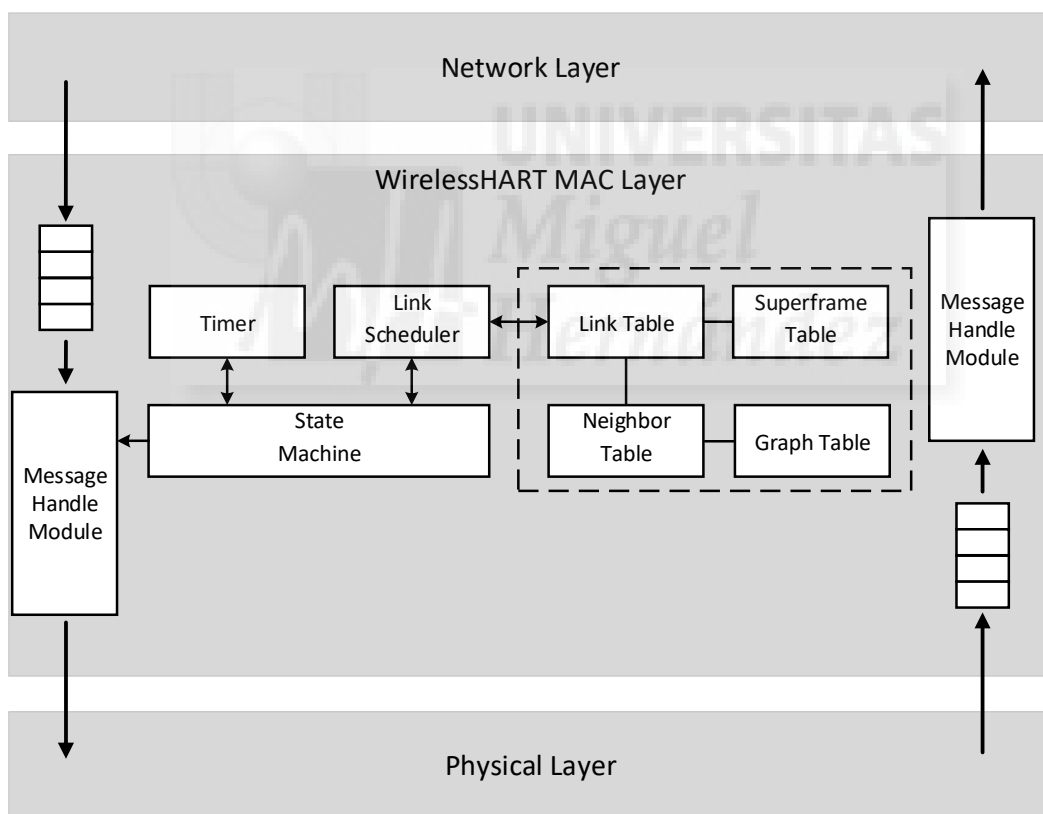


Figura 2-8. Arquitectura de la subcapa control de acceso al medio en WirelessHART.

A nivel de control de acceso al medio, además de las diferentes tablas detalladas anteriormente, todos los dispositivos han de disponer de un *Link Scheduler*, un *Timer* o

contador de tiempo, un *Message Handling Module* o módulo de gestión de paquetes y una *State Machine* o máquina de estados (ver Figura 2-8):

- El *Link Scheduler* determina, en base a la tabla de enlaces de comunicación y a la tabla de supertramas, el siguiente *slot* en el que se tiene que transmitir o recibir un paquete.
- El *Timer* o contador de tiempo, proporciona la sincronización necesaria para que el *slot* empiece en el mismo instante para todos los dispositivos de la red, y por lo tanto asegura el correcto funcionamiento del sistema.
- El *Message Handle Module* o módulo de gestión de paquetes almacena los paquetes destinados a la capa de red (capa superior) y a la capa física (capa inferior) por separado.
- La *State Machine* o máquina de estados de la subcapa de control de acceso al medio consta de tres componentes principales: la máquina de estados TDMA, los mecanismos XMIT y RECV. La máquina de estados TDMA es responsable de ejecutar la operación en un *slot* y ajustar correctamente el reloj. Los mecanismos XMIT y RECV comunican directamente con el hardware para enviar y recibir un paquete al/del transceptor radio.

### 2.3.3 Subcapa de control de enlace lógico

La subcapa de control de enlace lógico se encarga de proporcionar la funcionalidad de alto nivel de gestión de todas las interacciones entre la capa de enlace de datos, incluyendo entre otras funcionalidades, la preparación de los paquetes de la capa de enlace de datos o DLPDU (*Data-link Protocol Data Unit*) para transmisión, el análisis de los DLPDUs recibidos, el control de flujo y la detección de errores. El estándar WirelessHART define varios tipos de DLPDUs:

- El *Data* DLPDU contiene datos de nivel de red que han de ser enviados.
- El *ACK* DLPDU se emplea como respuesta a nivel de enlace de datos de una correcta recepción de un paquete que no haya sido enviado en modo *broadcast* u otro paquete *ACK* DLPDU.
- El *Advertise* DLPDU es usado por los dispositivos pertenecientes a la red, previa configuración por parte del *Network Manager*, para informar a los dispositivos que quieren acceder a la red acerca de cuándo y de cómo han de solicitar el acceso a la red, proceso descrito en detalle en el apartado 2.5.1. Los *Advertise* DLPDUs son enviados en modo *broadcast* y la información contenida consta del

ASN completo, la prioridad para la aceptación de nuevos dispositivos que depende entre otros factores del número de saltos hasta el *Gateway*, el mapa de canales de frecuencia utilizados por la red, así como el identificador del grafo, el enlace de comunicación y la supertrama que se ha de utilizar para enviar la solicitud de acceso al *Network Manager*.

- El *Keep-alive* DLPDU es usado para el mantenimiento de la red, para la sincronización temporal de los dispositivos de la red, para confirmar la conectividad de la comunicación con un vecino y para el proceso de descubrimiento de nuevos vecinos, proceso detallado en el apartado 2.5.2. Este paquete es de tipo *unicast* ya que se envía a un vecino concreto y solo contiene datos de nivel de capa de enlace de datos.
- El *Disconnect* DLPDU es utilizado para informar a los dispositivos vecinos que el dispositivo va a abandonar la red.

Todos los paquetes de la capa de enlace de datos o DLPDUs presentan la estructura que se representa en la Figura 2-9.

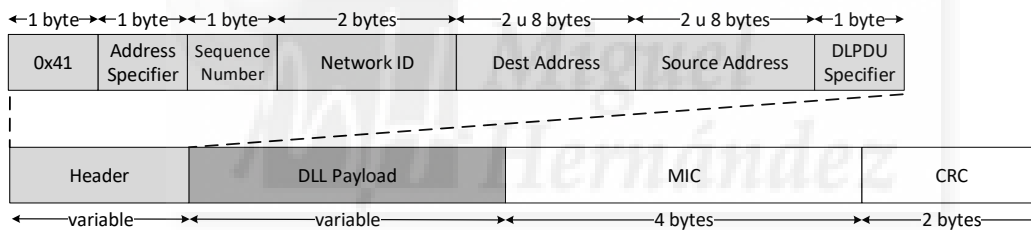


Figura 2-9. Estructura DLPDU.

La descripción de los distintos campos que componen los paquetes de la capa de enlace de datos es detallada a continuación:

- Un identificador 0x41 que expresa que el modo de datos y la seguridad están habilitados de acuerdo al estándar IEEE 802.15.4-2006 [13].
- El campo *Address Specifier* es un byte que especifica el formato de las direcciones de los dispositivos de entre los dos tipos de direcciones soportados en WirelessHART. El primer tipo de dirección es el *Nickname* que incluye solo el ID del dispositivo en la red y tiene una longitud de 2 bytes. El segundo tipo de dirección utiliza la numeración definida por el estándar IEEE EUI-64 [21], también conocida como dirección MAC, tiene una longitud de 8 bytes, es única para cada dispositivo e incluye información adicional como el tipo de dispositivo. Dentro del campo *Address Specifier*, el bit 6 especifica el tipo de dirección de



origen y el bit-2 especifica el tipo de dirección de destino. Si el valor de cualquiera de estos dos bits es 1, la dirección correspondiente a ese bit está en formato EUI-64, en otro caso, es el *Nickname*. Cualquier combinación de longitudes de las direcciones puede ser utilizada.

- El campo *Sequence Number*, de un byte de longitud, contiene el número de secuencia generado a partir del byte menos significativo del ASN.
- El campo *Network ID*, de dos bytes de longitud, se utiliza para identificar la red de manera única y por lo tanto para descartar paquetes recibidos de otras redes.
- Los campos *Dest Address* y *Source Address* tienen una longitud de dos bytes en el caso de utilizar el *Nickname* u ocho bytes en el caso de utilizar la numeración definida por el estándar IEEE EUI-64 y contienen la dirección de las estaciones origen y del destino del paquete a nivel de enlace de datos.
- El *DLPDU specifier*, de un byte de longitud, especifica el tipo de DLPDU enviado. Los tres bits menos significativos son empleados para distinguir el tipo de paquete (*ACK*, *Advertise*, *Keep-alive*, *Disconnect*, y *Data*). Los DLPDUs de tipo *ACK*, *Advertise*, *Keep-alive* o *Disconnect* son generados y consumidos por la capa de enlace de datos, por lo que su contenido no es propagado a la capa de red ni reenviado a otros dispositivos de la red. El cuarto bit indica si la comunicación está autenticada por la clave de la red. El quinto y el sexto bit son empleados para indicar la prioridad del paquete (alarma, normal, datos, comando) mientras que el séptimo y octavo bit están reservados para futuros usos.
- El campo *DLL (Data Link Layer) payload* contiene la carga útil del paquete y su contenido depende del tipo de DLPDU (*ACK*, *Advertise*, *Keep-alive*, *Disconnect*, y *Data*).
- El campo MIC (*Message Integrity Code*), de cuatro bytes de longitud, es empleado para autenticar el DLPDU y poder asegurar que ha sido generado por un dispositivo perteneciente a la red.
- Finalmente, el campo CRC (*Cyclic Redundancy Check*), de dos bytes de longitud, es empleado para verificar la correcta recepción del paquete, evaluando los 16 bits del campo CRC con los 16 bits obtenidos de realizar la operación CRC a los datos recibidos. El CRC realizado en WirelessHART se realiza, al igual que el estándar IEEE 802.15.4-2006 [13], en base al método CRC16 [22].

## 2.4 Capa de red

En WirelessHART el principal objetivo de la capa de red es proporcionar una comunicación fiable y segura entre dos dispositivos de la red, no necesariamente conectados directamente. Para ello, WirelessHART modela la capa de red en dos niveles, un nivel superior en el que se encuentran las funciones de seguridad de la información y un nivel inferior en el que se encuentran, fundamentalmente, las funciones de enrutamiento de la información.

La capa de red proporciona las funciones enrutamiento, gestiona las sesiones para la comunicación *end-to-end* con los dispositivos correspondientes y recibe/transmite los paquetes de datos de nivel de red desde/hasta la capa de enlace de datos. Si dispositivo que recibe la información es el destino de los datos, entonces la capa de red transfiere la información recibida a la capa superior. En caso contrario, remite dicha información hasta el siguiente dispositivo en la ruta utilizando para ello la capa de enlace de datos. La capa de red del estándar WirelessHART permite el enrutamiento de la información utilizando el enrutamiento por grafos o *Graph Routing* y el enrutamiento desde el origen o *Source Routing*. El enrutamiento por grafos o *Graph Routing* se basa en grafos predefinidos construidos por el *Network Manager* que incluyen enlaces (*edges*) dirigidos entre los distintos dispositivos de la red. El *Network Manager* tiene que construir los grafos sin bucles cerrados para evitar que un paquete se quede infinitamente en dicho bucle. La ruta que realmente siguen los paquetes de datos depende de las condiciones de la red en el instante en el que son transportados desde el origen al destino. Cada grafo está identificado por una única ID que es incluida en el campo correspondiente dentro de los paquetes de datos a nivel de red. Este identificador no especifica la ruta completa, sino que cada dispositivo intermedio en la ruta ha de ser previamente configurado con un fragmento del grafo global antes de usar este método de enrutamiento. El enrutamiento mediante grafos supone la utilización de rutas redundantes con una alta fiabilidad y es el utilizado normalmente para la comunicación entre los dispositivos y el *Gateway*, y entre el *Gateway* y los dispositivos. En una red correctamente configurada, los dispositivos deben de tener al menos dos dispositivos vecinos asociados a cada grafo para proporcionar redundancia en la ruta y mejorar la fiabilidad. La Figura 2-10 presenta, a modo de ejemplo, un grafo para la comunicación entre el dispositivo A y el dispositivo F empleando el enrutamiento mediante grafos.

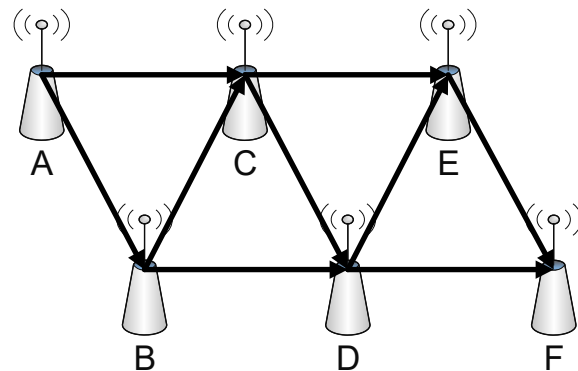


Figura 2-10. Ejemplo de grafo entre el dispositivo A y el dispositivo F.

El segundo de los mecanismos de enrutamiento definidos en WirelessHART es el enrutamiento desde el origen o *Source Routing*. Este mecanismo de enrutamiento utiliza una sola ruta entre el dispositivo origen y el dispositivo destino. Dicha ruta es incluida por el dispositivo origen dentro de la cabecera de la capa de red. En este caso, los dispositivos intermedios no requieren ningún conocimiento previo de la ruta. Cada dispositivo intermedio propaga el paquete de datos al siguiente dispositivo contenido en los datos de la capa de red. Este mecanismo de enrutamiento no ofrece redundancia en la transmisión entre el origen y el destino y solamente es utilizado para probar determinadas las rutas, como solución a determinados problemas de rutas, o en comunicaciones ad-hoc como las producidas durante el proceso de unión de un nuevo dispositivo a la red.

#### 2.4.1 Estructura funcional

En este apartado se presenta la estructura funcional de la capa de red definida en WirelessHART y que han de implementar los dispositivos de la red. La Figura 2-11 muestra la arquitectura de la capa de red en WirelessHART. Al igual que en la capa de enlace de datos, todos los dispositivos han de mantener a nivel de red una serie de tablas que controlan las comunicaciones, suministran información de enrutamiento, apoyan la confirmación entre origen y destino de los datos, garantizan la privacidad de las comunicaciones y recopilan estadísticas sobre las comunicaciones. Las tablas que controlan las actividades de comunicación a nivel de red son:

- La tabla de sesiones o *Session Table* en la que cada entrada representa un canal seguro entre el dispositivo origen y el dispositivo destino. Esta tabla la programa el *Network Manager* en cada dispositivo. Algunos de sus campos son: el tipo de sesión, la clave de la sesión y el contador de paquetes enviados con la clave de sesión.

- La tabla de rutas o *Route Table* asocia una sesión segura y una dirección y es utilizada para ayudar en la selección del grafo utilizado para la comunicación con el dispositivo correspondiente. Esta tabla la programa el *Network Manager* en cada dispositivo. Algunos de sus campos son: el identificador de la ruta, el tipo de ruta, el identificador del dispositivo destino de la ruta, el identificador del grafo, el número de paquetes transmitidos, la última vez que se utilizó y el número de paquetes recibidos.
- La tabla de rutas desde el origen o *Source Route Table* es una tabla que contiene entradas con una lista de hasta 8 dispositivos que traza la ruta hasta el dispositivo correspondiente. Esta tabla la programa el *Network Manager* en cada dispositivo. Algunos de sus campos son: el identificador de la ruta, el identificador del dispositivo destino de la ruta, y hasta 8 identificadores de dispositivos que conectan con el destino.
- La tabla de servicio o *Service Table* indica la ruta asociada a un servicio asignado por el *Network Manager*. Esta tabla la programa el *Network Manager* en cada dispositivo. Algunos de sus campos son: el indicador del servicio, el tipo de servicio, el dominio de aplicación, el destinatario del servicio, la duración del servicio y el identificador de la ruta a utilizar.

A nivel de red, además de las diferentes tablas detalladas anteriormente, todos los dispositivos han de disponer de una *State Machine* o máquina de estados, que junto a los módulos de gestión y seguridad controlan el funcionamiento del dispositivo a nivel de red (ver Figura 2-11):

- La máquina de estados o *State Machine* define los distintos estados en que se puede encontrar un dispositivo dentro de la red. En el estado *Idle* el dispositivo está en reposo y su transmisor inalámbrico no está activo, por lo que no tiene conocimiento de la red. En el estado *Joining* el dispositivo está a la escucha de paquetes de la red, tratando de recibir un *Advertise* DLPDU para solicitar el acceso a la red. En el estado *Quarantined* el dispositivo ha accedido correctamente a la red, pero solo tiene permiso para comunicarse con el *Network Manager*. En el estado *Operational* el dispositivo está completamente integrado en el funcionamiento del sistema. En el estado *Suspended* el dispositivo está suspendido, manteniendo intactas todas las tablas.

- La función del módulo de gestión o *Network Management* es la gestión de los distintos paquetes a nivel de red, así como la elección del paquete que ha de ser enviado a la capa de enlace de datos.
- La función del módulo de seguridad o *Security Module* es proporcionar seguridad en las comunicaciones comprobando la integridad del mensaje a través de la generación y comparación del MIC. En WirelessHART, el MIC se genera y confirma usando la técnica CCM (*Combined counter with CBC-MAC*) junto con el cifrado de bloques AES (*Advanced Encryption Standard*). Como mecanismo para la autenticación del mensaje se utiliza el esquema de cifrado por bloques AES-128 [23], tal y como se especifica en el estándar IEEE 802.15.4-2006 [13].

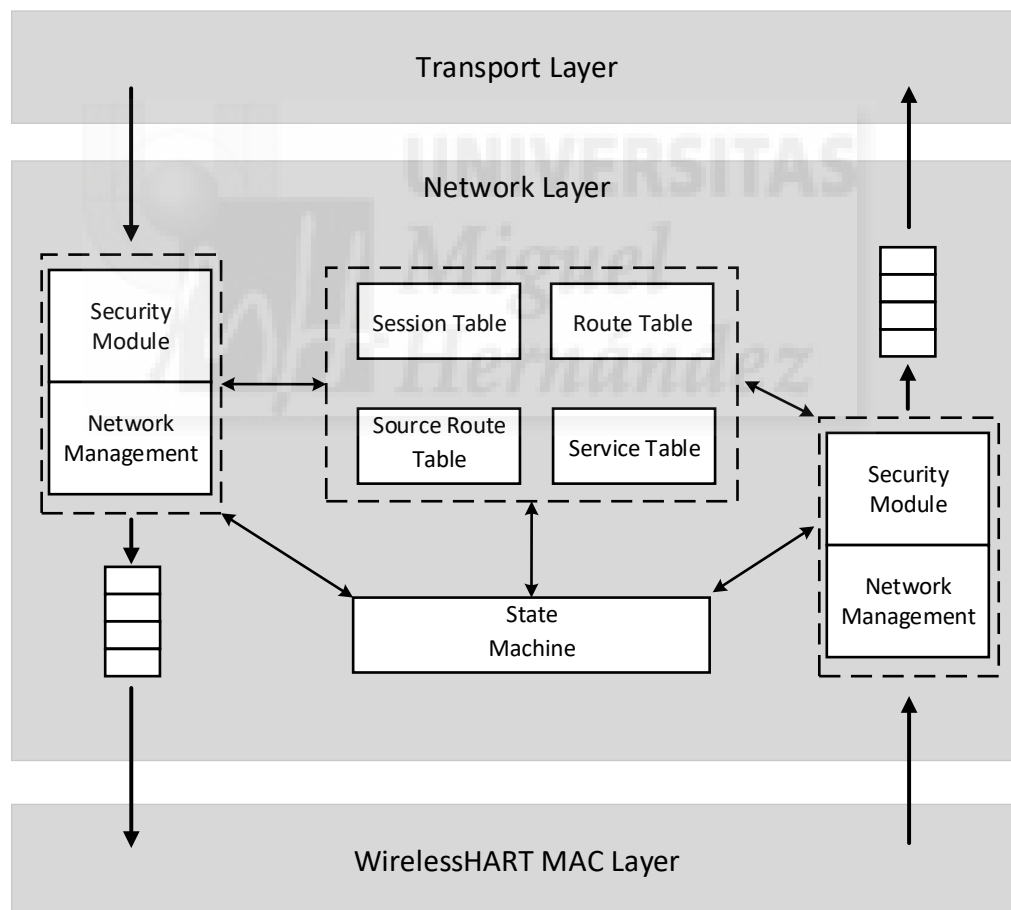


Figura 2-11. Arquitectura de la capa de red en WirelessHART.

### 2.4.2 Servicio de transferencia de datos

La capa de red también se encarga de proporcionar el servicio de alto nivel encargado de la preparación de los paquetes de la capa de red o NPDU (*Network layer Protocol Data Unit*) que posteriormente son enviados a otros dispositivos de la red utilizando la capa de acceso al medio. Todos los paquetes de la capa de red o NPDU presentan la estructura que se representa en la Figura 2-11. A continuación se detalla la distribución de los distintos campos que componen el paquete NPDU:

- El campo *Control*, de un byte de longitud, indica si las direcciones empleadas a nivel de red están en formato *Nickname* o EUI-64.
- El campo *HTL (Hop To Live)*, de un byte de longitud, es utilizado como contador del número saltos restantes del paquete y debe ser reducido en una unidad en cada salto. Si este campo alcanza el valor cero, el paquete debe de ser descartado y no reenviado.
- El campo *ASN snippet*, de dos bytes de longitud, contiene los dos bytes menos significativo del ASN del instante en que se generó el paquete a nivel de red. En paquetes con retardo acotado, este campo es utilizado para comprobar el retardo acumulado y determinar si es o no descartado.
- El campo *Graph ID*, de dos bytes de longitud, identifica la ruta seguida por el paquete a nivel de red. La información de este campo junto con las tablas a nivel de red proporcionan una lista de dispositivos que pueden ser empleados para reenviar el paquete hasta el destino final.
- Los campos *Dest Address* y *Source Address*, de dos u ocho bytes de longitud, contienen la dirección origen y destino del paquete a nivel de red en formato *Nickname* o EUI-64.
- El campo *Security Control*, de un byte de longitud, es utilizado por la capa de seguridad para garantizar una comunicación segura entre los dispositivos origen y destino.
- El campo *Counter*, de un byte de longitud, es utilizado por el algoritmo de cifrado a nivel de seguridad.
- El campo *MIC*, de cuatro bytes de longitud, es empleado para autenticar el paquete a nivel de red.
- El campo *Encrypted Payload* contiene los datos de la capa superior.

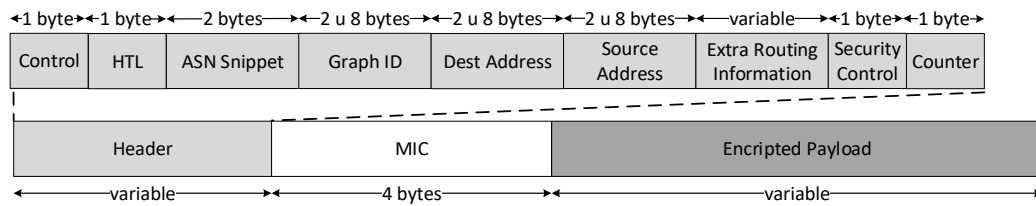


Figura 2-12. Estructura NPDU.

## 2.5 Network Manager

El *Network Manager* o *Gestor de Red* representa un papel esencial en una red WirelessHART ya que configura cada capa de la pila de protocolos de cada dispositivo de la red. La Tabla 2-2 presenta las principales responsabilidades del *Network Manager* según el estándar, agrupadas por funciones: formación y configuración de la red, enrutamiento, planificación de la red, gestión de canales, y diagnóstico y adaptación de la red. Entre otras funciones, el *Network Manager* es responsable de inicializar la red WirelessHART configurando para ello los *Gateways* que contienen los puntos de acceso inalámbricos, de gestionar los mecanismos para permitir a los dispositivos acceder y abandonar la red, de gestionar, monitorizar y optimizar la red, así como de la programación de los enlaces de comunicación, de las rutas y de los canales a utilizar en cada uno de los dispositivos de la red. Si bien es posible que por redundancia haya más de un *Network Manager* en la red, solo uno de ellos puede estar activo.

El estándar WirelessHART establece que el *Network Manager* ha de gestionar de forma centralizada la topología de la red en el despliegue de la misma y actualizarla en base a los cambios reportados por los distintos dispositivos en los *Health Reports* enviados. Para ello, el *Network Manager* ha de crear y gestionar todas las rutas de la red, lo cual implica gestionar de forma centralizada las distintas tablas y configurarlas en cada uno de los dispositivos de la red. En particular, a nivel de red, el *Network Manager* tiene que gestionar y configurar la tabla de rutas, la tabla de sesiones y la tabla de servicios, mientras que a nivel de enlace de datos ha de gestionar y configurar la tabla de supertramas, la tabla de enlaces de comunicación y la tabla de grafos en cada uno de los dispositivos. Es importante destacar que la implementación de los protocolos para determinar las rutas concretas entre dos dispositivos, los enlaces de comunicación que se asignan a cada dispositivo o cómo se organizan las supertramas está fuera del alcance del estándar WirelessHART. Sin embargo, el estándar establece a través de un anexo ciertas directrices. Por ejemplo, se indica que el número mínimo de saltos al construir un grafo es de 2 y que el número máximo de saltos al construir un grafo es de 4.

Tabla 2-2. Responsabilidades del *Network Manager*.

Función	Responsabilidades
Formación y configuración de la red	Inicializar la red e inicializarse a sí mismo. Gestionar la topología de la red. Gestionar la distribución de las claves de seguridad. Gestionar el proceso de acceso de nuevos dispositivos. Asignar y gestionar los <i>Nickname</i> (ID del dispositivo en la red). Establecer una conexión con el <i>Gateway</i> . Gestionar la configuración de la red. Responder a las solicitudes de información de la red.
Enrutamiento	Crear y administrar las rutas de la red. Recopilar estadísticas de la red e información de las tablas de vecinos. Construir las tablas de rutas mediante grafos. Generar las listas de rutas mediante <i>Source Routing</i> . Asignar enlaces de comunicación a los dispositivos de red y al <i>Gateway</i> .
Planificación de la red	Crear las supertramas. Asignar enlaces de comunicación a las supertramas. Crear las tablas de enlaces de comunicación. Activar y desactivar supertramas en función de las aplicaciones.
Gestión de canales	Llevar un registro de los canales incluidos en la lista negra ( <i>blacklist</i> ). Proporcionar el <i>Channel Offset</i> utilizado para el salto de canal.
Diagnóstico y adaptación de la red	Mantener la información de diagnóstico general de la red inalámbrica. Mantener registro de información del estado de cada dispositivo. Asignar enlaces de comunicación en base a lo solicitado. Optimizar las rutas y la asignación de los enlaces de comunicación.

El estándar WirelessHART establece ciertas condiciones relacionadas con la asignación de los enlaces de comunicación para la gestión de la red. En concreto establece que:

- El *Network Manager* ha de asignar dentro de la supertrama de gestión un enlace de comunicación para cada dispositivo de red hasta el *Gateway*, comenzando con los dispositivos situados a mayor número de saltos y utilizando el mismo grafo. El *Network Manager* también ha de asignar un segundo enlace de comunicación dedicado por la misma ruta para un posible primer reintento y un tercer enlace de comunicación compartido a través de otra ruta diferente para un segundo reintento.



- El *Network Manager* ha de asignar un enlace de comunicación común a todos los dispositivos de red dentro de la supertrama de gestión para el descubrimiento de vecinos. El *Network Manager* también ha de asignar en cada dispositivo un valor del intervalo máximo de envío de *Keep-alive* DLPDUs en dicho enlace (*Discovery\_time*) que implique la activación del descubrimiento de vecinos.
- El *Network Manager* ha de asignar al menos un enlace de comunicación dentro de la supertrama de gestión por cada dispositivo de red para el envío de *Advertise* DLPDUs.
- El *Network Manager*, comenzando por los dispositivos más alejados del *Gateway*, ha de asignar un enlace de comunicación dentro de la supertrama de gestión en cada salto desde cada dispositivo hasta el *Gateway* para enviar al *Network Manager*, sin redundancia, las peticiones de acceso de los dispositivos que solicitan el acceso a la red.
- El *Network Manager*, utilizando el algoritmo BFS (*Breath-First Search*) [24], ha de asignar un enlace de comunicación dentro de la supertrama de gestión en cada salto desde el *Gateway* a cada dispositivo para enviar sin redundancia las respuestas a las peticiones de acceso a la red.

En cuanto a la asignación de los enlaces de comunicación, si bien no se especifica un protocolo concreto, sí se especifican ciertas condiciones que han de ser cumplidas. A nivel general el estándar WirelessHART establece que:

- La duración de la supertramas de gestión ha de ser de 6400 *slots*.
- La duración de las diferentes supertramas de datos han de ser de la forma  $2n$ , esto es, las duración de la supertramas de datos ha de ser 250ms, 500ms, 1s, 2s, 4s, 8s, 16s, 32s, 64s o un valor superior.
- La supertrama de gestión ha de tener prioridad sobre las supertramas de datos.
- Ningún dispositivo ha de ser programado para escuchar dos canales diferentes en un mismo *slot*.
- El número máximo de canales activos ha de estar determinado por el número de canales habilitados y ha de estar limitado por la lista negra de canales que no se pueden utilizar (*blacklist channel*).

- La asignación de enlaces de comunicación para la gestión de la red y el envío de datos sin incluir las retransmisiones no ha de superar el 30% del ancho de banda de comunicación.
- La asignación final de enlaces de comunicación ha de tener al menos el 50% de los enlaces de comunicación libres, esto es, la asignación de enlaces de comunicación incluyendo los reintentos, las escuchas, los *Advertise* DLPDUs y los enlaces de comunicación para la gestión del acceso de nuevos dispositivos a la red.

Finalmente, el estándar WirelessHART también establece ciertas condiciones relacionadas con la asignación de enlaces de comunicación para la transmisión de datos. En concreto el estándar WirelessHART establece que:

- El *Network Manager* ha de determinar la duración de la supertrama de datos de cada transmisión en base a la velocidad de generación de los datos de cada dispositivo.
- El *Network Manager* ha de asignar los enlaces de comunicación comenzando por las comunicaciones con menor duración de supertrama y finalizando con las comunicaciones con mayor duración de supertrama.
- El *Network Manager* ha de programar, en rutas de múltiples saltos, cada salto de forma previa al siguiente salto.
- El *Network Manager*, por redundancia en el envío de los datos, ha de asignar una transmisión y un primer reintento en una ruta y un segundo reintento en una segunda ruta.

En el marco de la presente tesis, los mecanismos incluidos en WirelessHART para el acceso de un dispositivo a la red y para el descubrimiento de vecinos son de especial relevancia al considerar dispositivos con movilidad que requieren acceder a la red y detectar nuevos dispositivos vecinos mientras se desplazan. Por ello, ambos procesos va a ser explicados en detalle en los apartados 2.5.1 y 2.5.2.

### **2.5.1 Acceso de un nuevo dispositivo a la red**

El proceso de acceso a la red es importante desde el punto de vista del despliegue de nuevos dispositivos, tanto estáticos como móviles. El proceso de acceso a la red es un proceso que requiere acciones tanto a nivel de enlace de datos, como a nivel de red. A nivel de enlace de datos las tareas a realizar están principalmente orientadas a la

sincronización de los *slots* temporales. A nivel de red, los procesos necesarios básicamente consisten en el establecimiento de las rutas y la configuración necesaria para que el nuevo dispositivo pueda comunicarse con el *Network Manager* y con otros dispositivos de la red. Tal y como se muestra en la Figura 2-13, antes de que un dispositivo pueda acceder a la red, éste ha de ser configurado previamente con el identificador de la red a la que el dispositivo ha de solicitar el acceso, así como con la clave de seguridad a emplear durante el proceso de acceso utilizando un dispositivo de tipo *Handheld*.

Una vez el nuevo dispositivo ha sido configurado correctamente, ya puede ser desplegado para que active la radio en modo recepción y comience a recibir paquetes enviados por dispositivos que tienen el mismo identificador de red que la que se ha configurado. El nuevo dispositivo permanece un determinado tiempo en un canal de frecuencia, de entre los 15 canales disponibles, a la espera de recibir un paquete válido de la red. En caso de que transcurrido un determinado tiempo no haya recibido ningún paquete, el dispositivo pasa al siguiente canal. Este proceso se repite de forma secuencial hasta que el dispositivo recibe un paquete que incluye el identificador de la red correspondiente y lleva a cabo un proceso de sincronización a nivel de *slot*.

Una vez el nuevo dispositivo está correctamente sincronizado, el dispositivo utilizará el primer *Advertise* DLPDU que reciba de cualquier dispositivo perteneciente a la red dentro de su rango de cobertura para conocer la lista de canales activos en la red y restringir la escucha de canales a los canales activos. Es importante recordar que los *Advertise* DLPDUs son transmitidos en modo *broadcast* en enlaces de comunicación dedicados, por lo que no se producen colisiones con otros paquetes transmitidos por los dispositivos de la red. Todos los *Advertise* DLPDUs recibidos que se corresponden con el identificador de la red a la que se quiere unir el nuevo dispositivo son pasados a la capa de red para que el dispositivo pueda configurar la tabla de supertramas y la tabla de enlaces de comunicación. Una vez el dispositivo ha recibido varios *Advertise* DLPDUs, puede iniciar la solicitud de unión a la red, tal y como se muestra en la Figura 2-13. Debido a que el dispositivo puede haber detectado previamente más de un dispositivo a través del cual enviar la solicitud de acceso a la red, el dispositivo escoge de la tabla de enlaces de comunicación la entrada correspondiente al dispositivo con mayor calidad de señal, medida en términos de *RSSI* (*Received Signal Strength Indicator*) de los *Advertise* DLPDUs recibidos y mayor prioridad de unión. Una vez identificado el dispositivo que se va a utilizar para enviar la solicitud de acceso a la red, el dispositivo que solicita el acceso realiza la transmisión en el enlace de comunicación indicado en el *Advertise* DLPDU

correspondiente. A nivel de red, la petición de acceso, destinada al *Network Manager*, está encriptada con la clave configurada previamente por el *Handheld* e incluye la lista de vecinos previamente detectados y el correspondiente nivel de señal con cada uno de ellos.

Una vez la solicitud de acceso es recibida correctamente por el dispositivo utilizado para enviar la solicitud de acceso a la red, éste confirma su recepción a través del correspondiente *ACK DLPDU* y la reenvía hacia el *Network Manager* siguiendo el método de enrutamiento por grafos. Una vez la solicitud de acceso es recibida por el *Network Manager*, éste comprueba si el dispositivo que solicita el acceso puede o no tener acceso a la red, mediante la comprobación de la clave usada a nivel de red en el paquete. Si el dispositivo tiene autorización para acceder, el *Network Manager* selecciona de entre los vecinos reportados por el dispositivo, el dispositivo que actuará como *Proxy* durante la configuración del nuevo dispositivo. El dispositivo escogido por el *Network Manager* como *Proxy* puede o no ser el mismo que previamente se ha utilizado para enviar la solicitud de acceso ya que el *Network Manager* desconoce el dispositivo utilizado en primera instancia para enviarle la solicitud de acceso. Para que el dispositivo que solicita el acceso pueda recibir la respuesta procedente del *Network Manager*, ha de estar en modo recepción en todos aquellos enlaces de comunicación en los que cualquiera de sus vecinos le podría reenviar la respuesta del *Network Manager*. La lista de enlaces de comunicación en los que ha de estar en recepción es obtenida de los *Advertise DLPDUs* previamente recibidos. Además, para mantener la sincronización con todos los dispositivos vecinos reportados al *Network Manager*, el dispositivo que está solicitando el acceso ha de transmitir *Keep-alive DLPDUs*. El dispositivo por el cual se reciba la respuesta de la solicitud de unión a la red será el *Proxy* encargado de retransmitir todos los paquetes entre el nuevo dispositivo y el *Network Manager* mientras el nuevo dispositivo no esté completamente configurado.

Tal y como se muestra en la Figura 2-13, el *Network Manager* utiliza el dispositivo *Proxy* en primer lugar para indicar al nuevo dispositivo la clave de red, la clave de sesión y el *Nickname* a utilizar en todas las comunicaciones. Posteriormente, el *Network Manager* configura la red para permitir el envío de paquetes por parte del dispositivo que solicita el acceso a la red. En primer lugar configura los dispositivos pertenecientes a la red (en la Figura 2-13 se observa cómo en primer lugar configura el *Neighbor/Proxy*, y posteriormente configura al nuevo dispositivo). Para configurar el nuevo dispositivo, el *Network Manager*, entre otra información, le envía la lista de supertramas, rutas y enlaces de comunicación, mediante los correspondientes comandos de la capa de

aplicación (por ejemplo el comando 965 es utilizado para enviarle la lista de supertramas, el comando 967 es utilizado para enviarle la lista de enlaces de comunicación y el comando 969 es utilizado para enviarle la lista de grafos). Durante la configuración del nuevo dispositivo, el *Network Manager* también le indica el dispositivo de la red con el que tiene que sincronizar periódicamente el reloj y ajustar el comienzo del *slot*. Una vez ha sido completamente configurado, el nuevo dispositivo se considera al mismo nivel que cualquier otro dispositivo de la red y puede transmitir y recibir paquetes de datos, de gestión o de anuncio igual que el resto de dispositivos de la red.

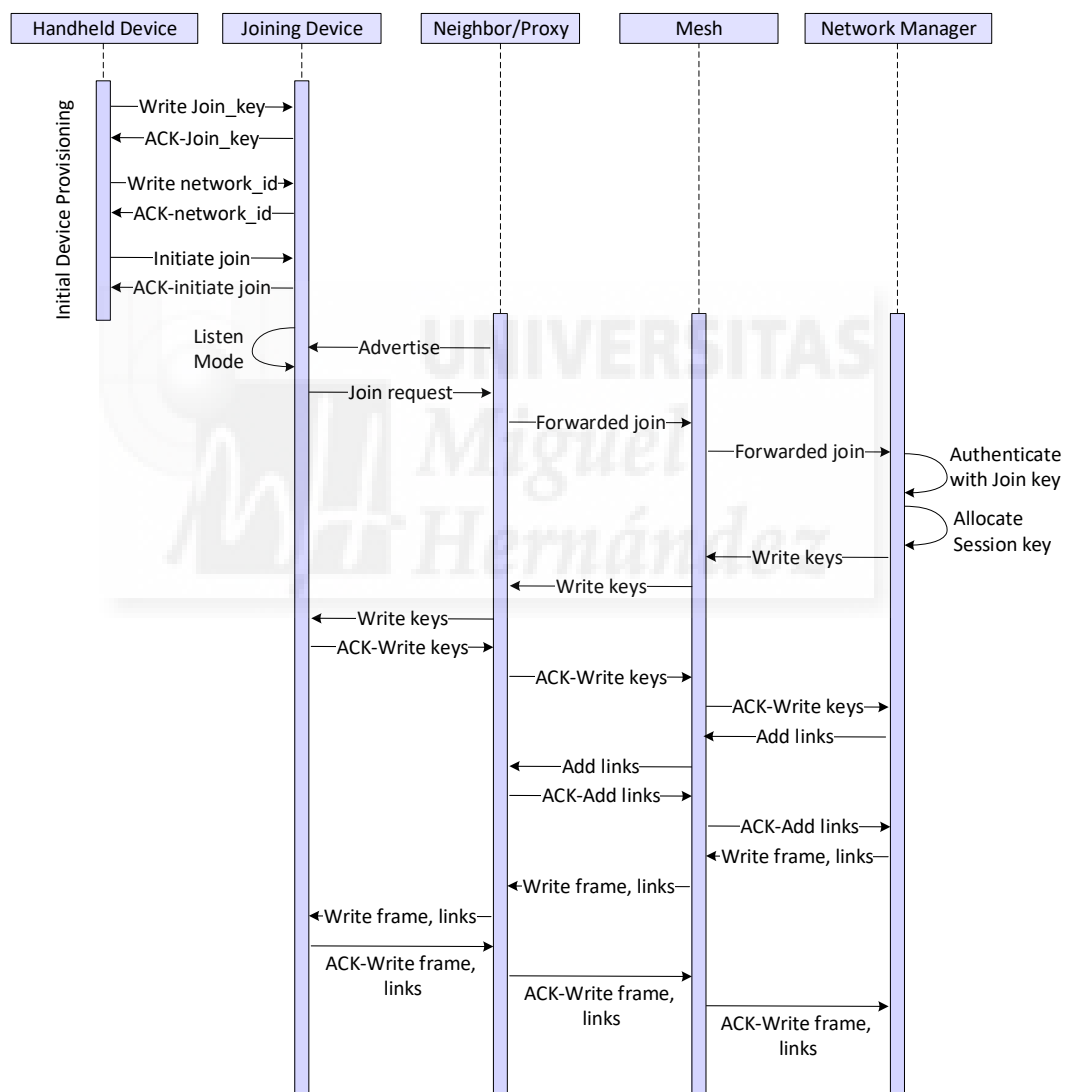


Figura 2-13. Secuencia de acceso de un nuevo dispositivo en WirelessHART.

### 2.5.2 Descubrimiento de vecinos

Una vez los dispositivos han accedido a la red, los dispositivos han de monitorizar la conexión con cada uno de sus vecinos, descubrir nuevos dispositivos vecinos y reportar periódicamente dicha información al *Network Manager*. Este proceso es crítico para que el *Network Manager* pueda gestionar adecuadamente la red y optimizar su rendimiento y fiabilidad. El estándar WirelessHART define un mecanismo para el descubrimiento de dispositivos vecinos, es decir, para el descubrimiento de dispositivos con los que puede establecerse una comunicación directa sin emplear dispositivos intermedios. Este mecanismo se basa en la transmisión de *Keep-alive* DLPDUs en un enlace de comunicación común y compartido por todos los dispositivos de la red denominado *Discovery Link*. El *Network Manager* es el encargado de configurar los *Discovery Links* en cada dispositivo. En cada *Discovery Link*, cada dispositivo perteneciente a la red escoge entre transmitir o recibir un *Keep-alive* DLPDU. Para ello, cada dispositivo escoge un periodo de tiempo aleatorio entre 0 y un valor indicado por el *Network Manager* (*Discovery\_time*) y activa un temporizador. Cuando el temporizador finaliza, el dispositivo transmite un *Keep-alive* DLPDU en el primer *Discovery Link* disponible y selecciona un nuevo tiempo de espera aleatorio entre 0 y *Discovery\_time* para transmitir el siguiente *Keep-alive* DLPDU. Para recibir *Keep-alive* DLPDUs enviados por otros dispositivos, los dispositivos han de estar en modo de recepción en todos los *Discovery Link* en los que no están transmitiendo su *Keep-alive* DLPDU.

En la Figura 2-14 se presenta un ejemplo del proceso de descubrimiento de vecinos en WirelessHART en el que participan dos dispositivos. La Figura 2-14 muestra 5 supertramas, en las que cada supertrama contiene un *Discovery Link*, identificados desde DL 1 a DL 5. El dispositivo A escoge un tiempo aleatorio equivalente a dos supertramas, mientras que el dispositivo B, escoge un tiempo aleatorio equivalente a tres supertramas. Así, en el primer *Discovery Link* (DL 1), ambos dispositivos están en recepción (*Discovery Link* en verde) y no se detectan entre sí. En el segundo *Discovery Link* (DL 2), el temporizador del dispositivo A ha saltado y procede a realizar la transmisión de un *Keep-alive* DLPDU (*Discovery Link* en azul), mientras que el dispositivo B está en modo recepción (*Discovery Link* en verde). En este segundo *Discovery Link*, el *Keep-alive* DLPDU transmitido por A es recibido por B. Tras enviar el *Keep-alive* DLPDU, el dispositivo A vuelve a escoger un tiempo aleatorio para el envío del siguiente *Keep-alive* DLPDU. En el tercer *Discovery Link* (DL 3), el temporizador del dispositivo B ha saltado y procede a realizar la transmisión de un *Keep-alive* DLPDU (*Discovery Link* en azul), mientras que el dispositivo A está en modo recepción (*Discovery Link* en verde), por lo que el *Keep-alive* DLPDU transmitido por A es recibido por B. Tal y como sucede

en el quinto *Discovery Link* (DL 5), es importante destacar que es posible que dos o más dispositivos transmitan un *Keep-alive* DLPDU en el mismo *Discovery Link* por ser un enlace de comunicación compartido. En este caso, las transmisiones de los *Keep-alive* DLPDUs pueden llegar a interferir entre sí en otros dispositivos hasta el punto de que en ciertos dispositivos se produzcan colisiones que impidan su correcta recepción.

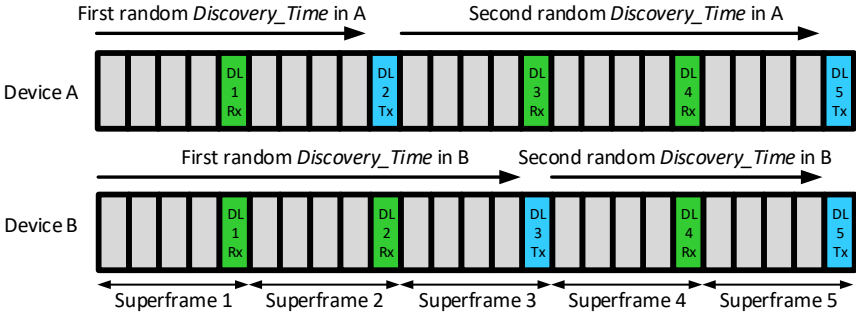


Figura 2-14. Ejemplo del proceso de descubrimiento de vecinos en WirelessHART.

Cuando un dispositivo recibe un *Keep-alive* DLPDU de un dispositivo que no había sido previamente identificado como un dispositivo vecino, lo incluye en su tabla de vecinos. Cada dispositivo, periódicamente reporta al *Network Manager* información de todos los vecinos detectados, incluyendo el nivel de señal medio con cada dispositivo a través de *Health Reports*. Tal y como se muestra en la Figura 2-15, el *Network Manager* tiene en cuenta la información recibida en los *Health Reports* de todos los dispositivos en la optimización de la red. Así, los grafos, las supertramas y los enlaces de comunicación de los distintos dispositivos de la red son optimizados por el *Network Manager* en base a la información reportada en los *Health Reports*.

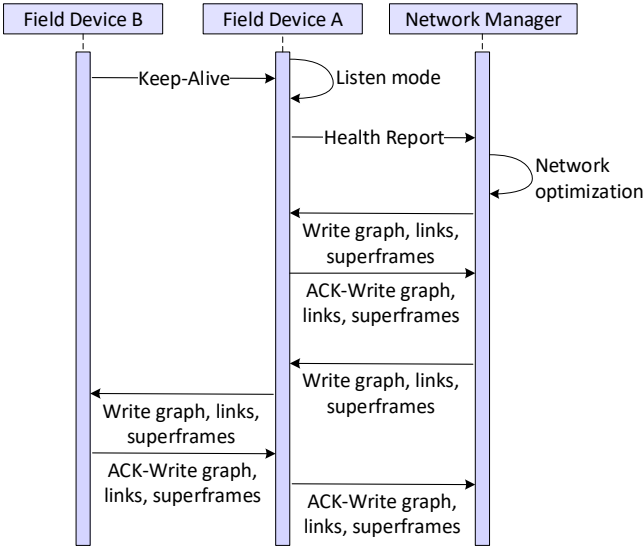


Figura 2-15. Optimización de la red a partir del descubrimiento de nuevos vecinos.





# 3

## **Impacto de la movilidad en redes inalámbricas industriales**

Las redes inalámbricas industriales actuales han sido diseñadas con el objetivo principal de satisfacer los requisitos de fiabilidad y retardo demandados por las aplicaciones industriales. Hasta la fecha, los estándares de comunicaciones inalámbricas industriales como WirelessHART no han sido diseñados considerando la posibilidad de que existan dispositivos móviles en la red, por lo que el rendimiento de las comunicaciones podría verse afectado negativamente ante la presencia de dispositivos móviles. Como punto partida de las investigaciones realizadas en esta tesis doctoral, se ha llevado a cabo una evaluación del impacto de la presencia de dispositivos móviles en el funcionamiento y rendimiento de redes inalámbricas industriales como WirelessHART. Este estudio fue iniciado en el Trabajo de Fin de Máster del autor de esta tesis [17], y ha sido extendido en el marco de la presente tesis doctoral. Como resultado de esta evaluación, se han identificado los principales retos y líneas de investigación que han de ser abordados para mejorar el rendimiento de las redes inalámbricas industriales en general, y del estándar WirelessHART en particular, cuando deben dar soporte a dispositivos móviles.

El apartado 3.1 presenta de forma resumida las investigaciones realizadas durante el Trabajo de Fin de Máster del candidato [17] y las principales conclusiones extraídas. En dichas investigaciones se evaluó el rendimiento del estándar WirelessHART en condiciones de movilidad. Para ello, se realizó un estudio de dimensionado que evaluó el rendimiento de las comunicaciones en función de los principales parámetros de configuración del estándar WirelessHART en diferentes escenarios y condiciones de evaluación. El apartado 3.2 presenta el estudio realizado en el marco de esta tesis doctoral sobre el impacto de la movilidad en la fiabilidad *end-to-end* de las comunicaciones inalámbricas industriales utilizando el estándar WirelessHART. Finalmente, el apartado 3.3 presenta las conclusiones obtenidas a partir de la investigación realizada, gracias a la cual se han identificado los principales retos resultantes de la integración de dispositivos móviles en redes inalámbricas industriales. Estos retos han sido la base que ha guiado el resto de investigaciones realizadas en esta tesis doctoral.

### **3.1 Estudio de dimensionado**

El análisis del impacto de la movilidad en redes inalámbricas industriales WirelessHART fue iniciado por el candidato en el Máster de Investigación en Tecnologías Industriales y de Telecomunicación, y publicado en su Trabajo de Fin de Máster [17]. El objetivo principal de ese análisis fue evaluar el rendimiento del estándar WirelessHART en entornos con movilidad. Para ello, se realizó un estudio de dimensionado en el que se analizó el rendimiento de la red en función de los principales parámetros de configuración del estándar WirelessHART. Este estudio tenía por objetivo analizar el rendimiento y funcionamiento de las redes inalámbricas industriales al introducir dispositivos móviles, e identificar los parámetros de configuración que minimizan el posible impacto negativo de la movilidad. Dada la relevancia de este trabajo en la investigación desarrollada en la presente tesis doctoral, este apartado presenta un resumen de los aspectos más importantes estudiados durante el Trabajo Fin de Master, incluyendo las condiciones en las que se realizó el dimensionado y los principales resultados obtenidos.

#### **3.1.1 Escenarios de evaluación**

Para evaluar el impacto de la movilidad en el rendimiento del estándar de comunicaciones industriales WirelessHART se consideraron cuatro escenarios. La Figura 3-1 muestra los cuatro escenarios particularizados para el caso en que el dispositivo móvil (dispositivo Z) se desplaza de forma rectilínea siguiendo la trayectoria marcada

por la flecha. Los cuatro escenarios consideraron un único *Gateway* (GW), el cual se asume conectado directamente al *Network Manager* mediante un enlace de comunicación cableado. El primer escenario permitió evaluar el impacto de la movilidad en un escenario simple pero realista, tratando de reducir al mínimo el número de saltos en las comunicaciones entre los dispositivos. El segundo escenario aumentaba el número de dispositivos estáticos conectados directamente al *Gateway*, lo cual permitió evaluar el impacto de dicho aumento en el rendimiento. El tercer escenario introducía dispositivos estáticos situados a diferentes saltos del *Gateway*, lo cual permitió evaluar el impacto del aumento del número de saltos en las comunicaciones entre los dispositivos estáticos desplegados. Finalmente, el cuarto escenario aumentaba el número de saltos en las comunicaciones entre el dispositivo móvil y el *Gateway*, lo cual permitió evaluar el impacto de dicho aumento en el rendimiento. En los cuatro escenarios considerados, la distancia entre dos dispositivos estáticos con conectividad directa era igual al rango de comunicación ( $R$ ). Fijar dicha distancia a  $R$  limita las rutas que pueden ser seleccionadas para conectar cualquier par de dispositivos de la red a aquellas rutas compuestas por las conexiones representadas por líneas discontinuas en la Figura 3-1. Así, en los tres primeros escenarios, el dispositivo Z se encontraba en todo momento a 2 saltos del *Gateway* ( $Z \rightarrow A \rightarrow GW$  o  $Z \rightarrow B \rightarrow GW$ ), por lo que los paquetes de gestión y de datos eran retransmitidos por el dispositivo A o por el dispositivo B, dependiendo de con qué dispositivo tuviera conectividad el dispositivo Z. En el cuarto escenario, el dispositivo Z estaba conectado a los dispositivos E y F cuando se desplazaba. En este cuarto escenario, el dispositivo Z se encontraba en todo momento a 4 saltos del *Gateway* ( $Z \rightarrow E \rightarrow C \rightarrow A \rightarrow GW$  o  $Z \rightarrow F \rightarrow D \rightarrow B \rightarrow GW$ ), por lo que los paquetes de datos y de gestión eran retransmitidos por los dispositivos E, C y A o por los dispositivos F, D y B, dependiendo de si el dispositivo evaluado tenía conectividad con E o con F.

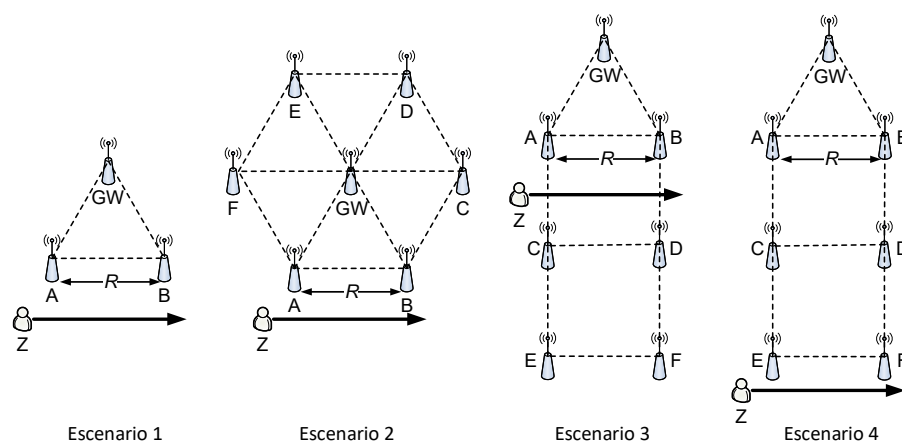


Figura 3-1. Escenarios propuestos en [17] para evaluar el rendimiento de WirelessHART ante la presencia de dispositivos móviles.

Sobre los escenarios propuestos se analizaron tres casos relativos a diferentes procesos de movilidad: *estático*, *reasociación* y *traspaso*. En la Figura 3-2 se muestran los tres casos propuestos para el escenario 1 y la trayectoria seguida por el dispositivo móvil Z en los casos de reasociación y traspaso. Las líneas discontinuas azules representan los rangos de cobertura de los distintos dispositivos desplegados. En el caso *estático*, el dispositivo Z permanecía inmóvil durante toda la evaluación, y dentro del rango de cobertura del dispositivo A para los escenarios 1, 2 y 3, y dentro del rango de cobertura del dispositivo E para el escenario 4. En el caso *reasociación*, el dispositivo Z se desplazaba siguiendo una trayectoria rectilínea de forma que entraba en el rango de cobertura de los dispositivos A y B en los escenarios 1, 2 y 3, y de los dispositivos E y F en el escenario 4. En este caso, el dispositivo Z realizaba una reasociación tras perder la conectividad con el dispositivo con el que previamente tenía asignados los enlaces de comunicación. Es decir, en los escenarios 1, 2 y 3, el dispositivo móvil necesitaba realizar una solicitud de acceso tanto al dispositivo A, como al dispositivo B tras perder la conectividad con A, debido a su desplazamiento. Esto se traduce en que durante un tiempo el dispositivo no tiene conectividad con la red, y por tanto no puede enviar ni recibir paquetes de datos. En el caso *traspaso*, el dispositivo se desplazaba siguiendo la misma trayectoria rectilínea, y el *Network Manager* realizaba un traspaso de los enlaces de comunicación antes de perder la conectividad con el dispositivo con el que previamente los tenía asignados. Por lo tanto, en este caso el dispositivo móvil solo realizaba una solicitud de acceso al dispositivo A (en los escenarios 1, 2 y 3) o al dispositivo E (escenario 4), y no perdía la conectividad con la red en ningún instante. Este caso difiere del anterior en que una vez el dispositivo accede inicialmente a la red mantiene en todo instante la conectividad con la red y puede continuamente transmitir paquetes de datos.

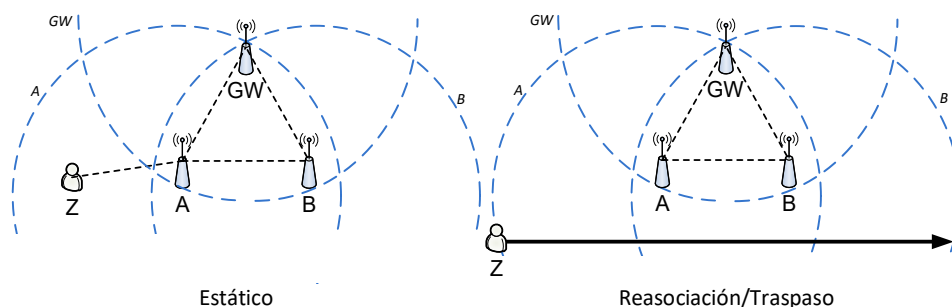


Figura 3-2. Casos propuestos en [17] para evaluar el rendimiento de WirelessHART ante la presencia de dispositivos móviles en el escenario 1.

El estudio de dimensionado se llevó a cabo considerando las mejores condiciones posibles para el estándar WirelessHART, lo que implicaba que WirelessHART presentaría peores resultados en otras condiciones menos favorables. Dichas condiciones fueron:

- Condiciones de propagación simplificadas. El modelo de propagación que se asumió en el análisis fue el modelo de propagación radio *unit disk* [25] que asume que dos dispositivos presentan una PDR igual 1 si su separación es menor o igual al rango de transmisión. En cambio, si su separación es mayor que el rango de transmisión, la PDR es igual a 0.
- Un único canal en frecuencia. En la capa física se asumió que todas las comunicaciones se realizaban en un único canal de los 15 canales disponibles en WirelessHART, y que dicho canal era conocido por todos los dispositivos que formaban o fuesen a formar parte de la red. Esta condición reducía el tiempo que un nuevo dispositivo requería para la recepción de los *Advertise* DLPDUs al permanecer a la escucha de un único canal de frecuencia durante el proceso de acceso a la red (proceso descrito previamente en el apartado 2.5.1).
- Sincronización perfecta. En la capa de enlace se asumió una perfecta sincronización entre los nuevos dispositivos que entraban en la red y los que ya formaban parte de la red, lo que también permitió minimizar el tiempo que necesita un nuevo dispositivo para entrar en la red al poder enviar la solicitud de acceso tras recibir un único *Advertise* DLPDU. También se asumió que el dispositivo era capaz de detectar la pérdida de la conectividad con la red en el instante en que ésta se producía, y que a continuación era capaz de iniciar de nuevo el proceso de acceso a la red; este nuevo proceso de acceso a la red fue denominado como proceso de reasociación en el estudio<sup>2</sup>.
- Distribución de enlaces de comunicación asignados. En las capas de enlace y red se consideró que los enlaces de comunicación asignados a las rutas de gestión de la red estaban distribuidos en la supertrama de gestión de forma consecutiva y en el orden empleado por los mensajes durante la solicitud de acceso a la red. De esta forma, se podía completar el acceso a la red en una única supertrama de

---

<sup>2</sup> El proceso de reasociación no ha sido formalmente definido en el estándar WirelessHART, y fue introducido en [17] como un mecanismo ideal que permitía solicitar una nueva asignación de rutas y enlaces de comunicación por parte de un dispositivo que había perdido la conectividad con sus antiguos vecinos. Para ello, el dispositivo utiliza los recursos asignados a la solicitud de acceso por parte de nuevos dispositivos.

gestión. También se consideró que el *Network Manager* era capaz de realizar una asignación consecutiva de enlaces de comunicación en los diferentes saltos que componen la ruta desde el dispositivo Z hasta el *Gateway*, y que podía comunicar dicha asignación a todos los dispositivos involucrados dentro de una única supertrama de gestión.

- Un único dispositivo transmisor de datos. En las capas superiores se consideró que solo el dispositivo Z tenía paquetes de datos que transmitir, si bien todos los dispositivos tenían que transmitir/recibir los paquetes relacionados con la gestión de la red.

### 3.1.2 Parámetros y métricas

WirelessHART tiene varios parámetros temporales que pueden tener una notable influencia en el mantenimiento de la conectividad a la red de los dispositivos móviles. La duración temporal de un enlace de comunicación fue definida como  $t_s$ . El número de enlaces de comunicación que componían una supertrama de gestión se definió como  $N_S$  y su duración temporal como  $T_N$ , pudiendo obtenerse la duración temporal de la supertrama de gestión como  $T_N = N_S \cdot t_s$ . La duración de la supertrama de gestión es clave para WirelessHART puesto que define la periodicidad con la que se asignan los enlaces de comunicación en los que se realizan las funciones de gestión de la red, por ejemplo: el acceso de nuevos dispositivos a la red; el proceso de descubrimiento de vecinos; el envío de información del estado de la red por parte de los dispositivos de la red; o la asignación de rutas y enlaces de comunicación a los dispositivos de la red por parte del *Network Manager*.

La cantidad de enlaces de comunicación que son utilizados para la gestión de la red también puede condicionar el mantenimiento de la conectividad de los dispositivos móviles. Así, el número de enlaces de comunicación dedicados a la gestión dentro de una supertrama fue definida como  $M$ , y el tiempo empleado por la gestión en una supertrama como  $T_M$ , pudiendo éste obtenerse como  $T_M = M \cdot t_s$ . El número de enlaces de comunicación que podían ser empleados para transmitir o recibir paquetes de datos en cada supertrama era  $N_S - M$ .

Finalmente, se definieron varios parámetros importantes que dependen del escenario y las condiciones de movilidad. Por un lado, el número de saltos entre el dispositivo Z (origen de los datos) y el *Gateway* (destino de los datos) fue definido como  $N_h$ . Además, se definió como  $t_e$  el tiempo que el dispositivo Z se encontraba bajo la cobertura de la red, lo cual dependía de cómo habían sido desplegados los dispositivos

en la red, del rango de cobertura de las comunicaciones ( $R$ ), y de la trayectoria y velocidad ( $v$ ) del dispositivo móvil Z. También se definió como  $t_{eAB}$  el tiempo que el dispositivo Z se encontraba simultáneamente bajo cobertura del dispositivo A y del dispositivo B.

En función del escenario, el número de enlaces de comunicación dedicados a la gestión dentro de la supertrama de gestión varía al cambiar el número de dispositivos desplegados, así como el número de saltos desde el *Gateway* a cada dispositivo. En la Tabla 3-1 se muestra el número de enlaces de comunicación dedicados a gestión ( $M$ ) dentro de una supertrama de gestión para los diferentes escenarios planteados cuando el dispositivo Z pertenece a la red (Con Z) y cuando todavía no pertenece a la red (Sin Z). El valor de  $M$  se obtenía como la suma de los enlaces de comunicación dedicados a la gestión de todos los dispositivos de la red. A modo de ejemplo para ilustrar el cálculo de  $M$ , en la Figura 3-3 se muestra la asignación de enlaces de comunicación de gestión asumida en el escenario 1 cuando el dispositivo Z no ha accedido todavía a la red ( $M=11$ ). En este escenario, era necesario asignar un enlace de comunicación común para poder realizar el proceso de detección de nuevos dispositivos vecinos (*Discovery*), tres enlaces de comunicación para el envío de los *Advertise* DLPDUs, y otros tres enlaces de comunicación para la recepción de los *Join Request* (uno por cada dispositivo de la red). Además, puesto que el *Network Manager* gestiona la red de forma centralizada a través del *Gateway*, los dispositivos A y B necesitaban cada uno tener asignados un enlace de comunicación para enviar paquetes de gestión al *Gateway* (*Mgmt. Upload*), y un enlace de comunicación para recibir paquetes de gestión desde el *Gateway* (*Mgmt. Download*).

Tabla 3-1. Número de enlaces de comunicación asignados a gestión ( $M$ ) [17].

	SIN Z	CON Z
Escenario 1	11	17
Escenario 2	27	33
Escenario 3	39	45
Escenario 4	39	49

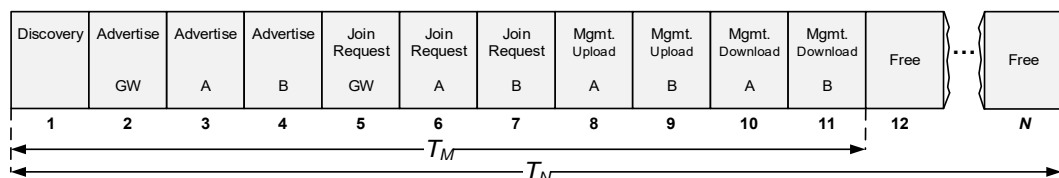


Figura 3-3. Asignación de enlaces de comunicación de gestión en la supertrama de gestión para el escenario 1 cuando el dispositivo móvil Z todavía no ha accedido a la red.

Para cuantificar el rendimiento de WirelessHART en condiciones de movilidad, se definieron en [17] una serie de métricas que a continuación se describen. El tiempo de acceso de un nuevo dispositivo a la red ( $t_a$ ) fue definido como el tiempo transcurrido desde que el dispositivo entraba en la zona de cobertura de algún dispositivo de la red, y el instante en el que se le asignaban uno o varios enlaces de comunicación para la transmisión de paquetes de datos y gestión. El tiempo medio de acceso a la red de un nuevo dispositivo era obtenido analíticamente mediante la ecuación (3-1).

$$\bar{t}_a = \frac{T_N + 2 \cdot T_M - t_s}{2} \quad (3-1)$$

La Figura 3-4 ilustra, para el escenario 1, el tiempo de acceso a la red de un nuevo dispositivo, y algunos de los parámetros descritos para los casos de reasociación y traspaso anteriormente definidos. Las líneas discontinuas azules de la Figura 3-4 representan los rangos de cobertura de los distintos dispositivos desplegados.

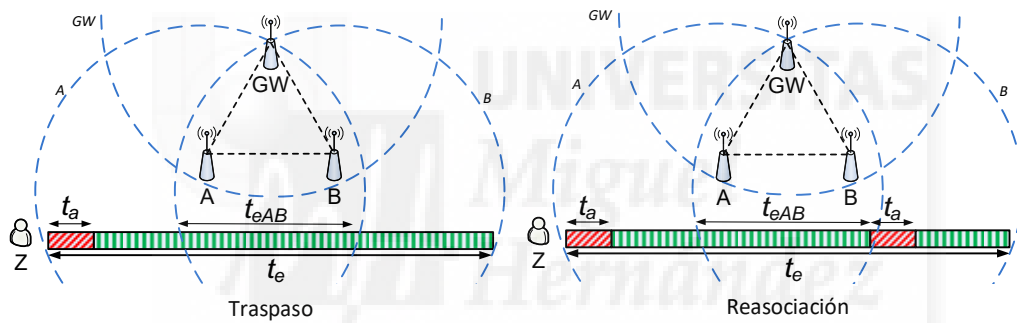


Figura 3-4. Ilustración del tiempo de acceso de un nuevo dispositivo a la red y de parámetros relacionados con los casos de *reasociación* y *traspaso* en el escenario 1.

El overhead de gestión ( $O_v$ ) fue definido como el ratio entre la cantidad de enlaces de comunicación dedicados a la gestión en cada supertrama de gestión ( $M$ ), y la cantidad de enlaces de comunicación totales de la supertrama de gestión ( $N_s$ ).  $O_v$  (ecuación (3-2)) es por lo tanto equivalente al ratio entre el tiempo dedicado en cada supertrama de gestión a la propia gestión ( $T_M$ ) y el tiempo total de una supertrama de gestión ( $T_N$ ).  $O_v$  proporciona una medida de la eficiencia de los mecanismos de gestión empleados por WirelessHART en cuanto al uso del canal radio; cuanto mayor sea  $O_v$  más ineficiente es la red puesto que se dedica una mayor proporción de los enlaces de comunicación a gestión.

$$O_v = \frac{M}{N} = \frac{T_M}{T_N} \quad (3-2)$$



Otra métrica importante que se definió fue la utilización del canal radio que puede ser asignado al dispositivo evaluado para transmitir paquetes de datos hasta el destino (*Data\_Ch\_Usage*). Esta métrica se definió como el ratio entre el número máximo de enlaces de comunicación que el *Network Manager* puede asignar al dispositivo móvil Z para transmitir paquetes de datos hacia el *Gateway* y el número total de enlaces de comunicación. Si bien el *Data\_Ch\_Usage* permitía analizar el impacto de la movilidad independientemente de factores tales como la tasa de transmisión instantánea o el tamaño de los paquetes de datos, sí tenía en cuenta el número de saltos  $N_h$  entre el destino de los datos (*Gateway*) y el dispositivo móvil Z. Para un dispositivo estático que previamente había accedido a la red, el *Data\_Ch\_Usage* podía obtenerse a partir de la ecuación (3-3). En [17] se introdujo el concepto de traspaso de las comunicaciones (*handover*) y reasociación de un dispositivo móvil, si bien estos procesos no estaban definidos en el estándar WirelessHART. Para el caso en el que se realizaban traspasos de las comunicaciones de forma que el dispositivo Z no perdía la conectividad con la red, el *Data\_Ch\_Usage* podía obtenerse a partir de la ecuación (3-4). Esta ecuación se obtiene como el producto dos factores: el ratio de enlaces de comunicación libres para transmitir datos (es decir, no utilizados para gestión) sobre el total de enlaces de comunicación, y el ratio de tiempo que el dispositivo tiene asignados enlaces de comunicación para transmitir datos sobre el tiempo que el dispositivo Z se encuentra bajo la cobertura de la red. Para el caso en el que el dispositivo Z debe realizar múltiples procesos de reasociación durante su desplazamiento, el *Data\_Ch\_Usage* podía obtenerse a partir de la ecuación (3-5).

$$Data\_Ch\_Usage = \frac{N_s - M}{N_s \cdot N_h} \quad (3-3)$$

$$Data\_Ch\_Usage = \left( \frac{N_s - M}{N_s \cdot N_h} \right) \cdot \left( \frac{t_e - t_a}{t_e} \right) \quad (3-4)$$

$$Data\_Ch\_Usage = \left( \frac{N_s - M}{N_s \cdot N_h} \right) \cdot \left( \frac{t_e - \sum t_a}{t_e} \right) \quad (3-5)$$

El estudio presentado en [17] también definió y presentó expresiones analíticas de la probabilidad de realizar un traspaso o una reasociación, del retardo ocasionado desde que el paquete se genera por la capa de red hasta que es entregado al destino, y del consumo de energía empleado en el proceso de gestión y acceso a la red de los dispositivos.

### 3.1.3 Resultados y conclusiones

Este apartado presenta los resultados más representativos de la evaluación presentada en [17] considerando los escenarios, parámetros y métricas descritos anteriormente.

La Figura 3-5a muestra cómo el tiempo de acceso ( $t_a$ ) tiene una dependencia lineal con la duración de la supertrama de gestión ( $T_N$ ), pero una escasa dependencia con los diferentes escenarios evaluados. Este resultado implica que desde el punto de vista del tiempo de acceso de un nuevo dispositivo conviene emplear una duración de la supertrama de gestión lo más pequeña posible. Los resultados obtenidos en el análisis del *overhead* ( $O_v$ ) (Figura 3-5b) mostraron en cambio, que el *overhead* se reducía al aumentar la duración de la supertrama de gestión. Esta reducción era consecuencia de que al aumentar la duración de la supertrama de gestión, menos enlaces de comunicación eran dedicados por unidad de tiempo a transmitir paquetes de gestión. Este resultado implica que desde el punto de vista del *overhead* conviene emplear una duración de la supertrama de gestión lo más grande posible, a diferencia del tiempo de acceso en el que conviene emplear una duración de la supertrama de gestión lo más pequeña posible.

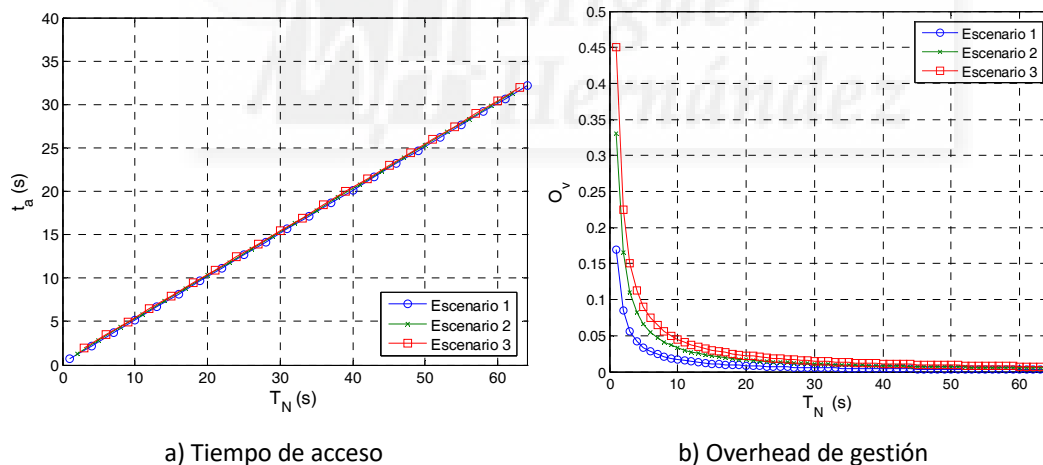


Figura 3-5. Tiempo de acceso (a) y Overhead de gestión (b) para los tres primeros escenarios evaluados [17].

La Figura 3-6 muestra la métrica *Data\_Ch\_Usage* en el primer escenario cuando se consideraba una duración de la supertrama de gestión de  $T_N=64$  segundos (valor recomendado en el estándar WirelessHART [10]). Siguiendo la ecuación (3-3), el *Data\_Ch\_Usage* era constante en el caso de que el dispositivo Z permaneciera estático,

puesto que dicho dispositivo se encontraba siempre conectado a la red<sup>3</sup>. En el caso de que el dispositivo Z fuera móvil, el *Data\_Ch\_Usage* variaba en función del tiempo que el dispositivo Z se encontraba bajo la cobertura de la red ( $t_e$ ): a menor  $t_e$ , menor *Data\_Ch\_Usage*. La Figura 3-6 también muestra que el tiempo empleado en volver a realizar el acceso a la red en el caso de que el dispositivo móvil necesitase realizar una reasociación ( $t_a$ ) resulta en una menor utilización del canal comparado con el caso en que se realiza un traspaso de las comunicaciones. Los resultados obtenidos muestran también que el acceso inicial a la red (realizado por el dispositivo móvil en los casos *reasociación* y *traspaso*) y el acceso a la red tras perder la conectividad (realizado por el dispositivo móvil en el caso *reasociación*) reducen el *Data\_Ch\_Usage*, especialmente cuando el tiempo que el dispositivo móvil Z se encontraba bajo la cobertura de la red era pequeño. Estos resultados muestran claramente el impacto negativo de la movilidad en comunicaciones inalámbricas industriales con gestión centralizada como es WirelessHART.

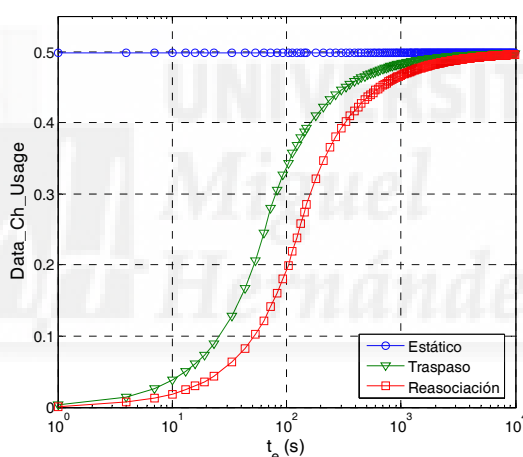


Figura 3-6. *Data\_Ch\_Usage* en función de  $t_e$  para los diferentes casos bajo el escenario 1 [17].

El análisis realizado también evaluó el *Data\_Ch\_Usage* obtenido para diferentes valores de duración de la supertrama de gestión en los distintos escenarios y casos. La Figura 3-7a muestra que en condiciones de baja movilidad (altos valores de  $t_e$ ) el *Data\_Ch\_Usage* aumenta en el caso de la reasociación con la duración de la supertrama. Esto se debe al hecho de que ante condiciones de baja movilidad, el dispositivo móvil

<sup>3</sup> En el escenario 1, el hecho de que el dispositivo Z estuviera a dos saltos del destino, implicaba que de cada 2 *slots* libres, uno fuera asignado al dispositivo Z para transmitir los paquetes de datos y el otro fuera asignado al dispositivo A o B para que lo retransmitiera hasta el *Gateway*. Este hecho limita la proporción del canal radio que puede ser empleada por el dispositivo Z para transmitir paquetes de datos hasta el destino (*Data\_Ch\_Usage*) a 0.5.

prácticamente no necesitaba realizar el proceso de reasociación, y por tanto convenía emplear duraciones de la supertrama de gestión grandes que redujeran el *overhead* asociado a la gestión de la red. Sin embargo, en condiciones de mayor movilidad (bajos valores de  $t_e$ ), el *Data\_Ch\_Usage* aumenta si se reduce la duración de las supertramas. Esto se debe al hecho de que al aumentar la movilidad, el dispositivo Z necesitaba realizar el proceso de reasociación de forma más frecuente y por tanto convenía emplear duraciones de la supertrama de gestión menores para reducir el tiempo de reasociación. Las mismas tendencias fueran observadas para el caso de traspaso (Figura 3-7b), si bien diferentes valores de *Data\_Ch\_Usage* fueron obtenidos al solo afectar al acceso inicial a la red.

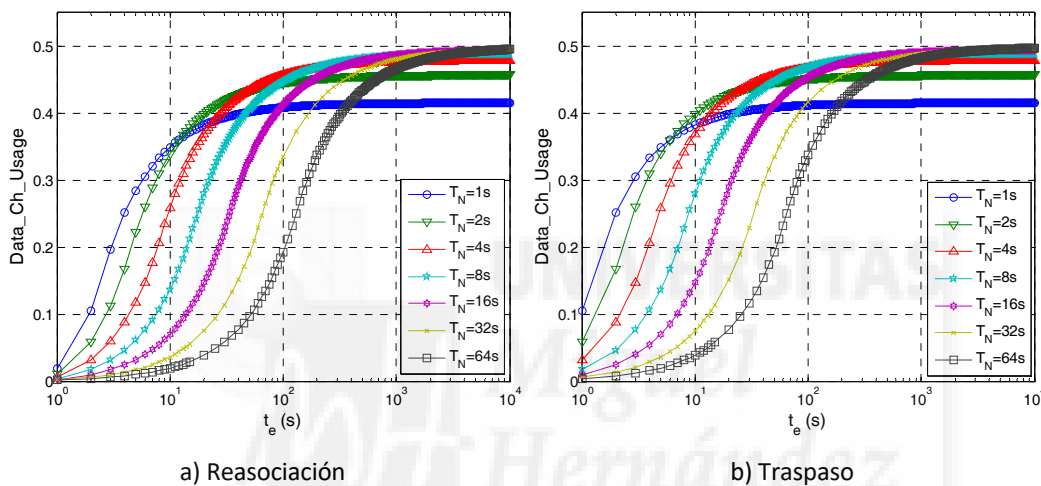


Figura 3-7. *Data\_Ch\_Usage* en función de  $t_e$  para diferentes valores de  $T_N$  en el escenario 1 [17].

La Figura 3-8 ilustra el efecto de la variación de la duración de la supertrama de gestión en el *Data\_Ch\_Usage* cuando el dispositivo móvil se desplaza a una velocidad de 3m/s en un escenario con  $R=200m$  (Figura 3-8a) y  $R=30m$  (Figura 3-8b). Los resultados corresponden al caso de realizar una reasociación en los diferentes escenarios evaluados. Los resultados muestran que cada escenario resulta en una duración de la supertrama de gestión diferente que maximiza el *Data\_Ch\_Usage*, si bien en todos los casos, la duración de la supertrama de gestión que maximizaba el *Data\_Ch\_Usage* era significativamente menor que la duración recomendada en el estándar WirelessHART (64 segundos). Los resultados obtenidos también muestran la influencia de la variación del número de saltos entre el origen y el destino de los datos. Mientras que en los escenarios 1, 2 y 3, el dispositivo Z podría hacer llegar su paquete hasta el *Gateway* a través de los dispositivos A o B que actuaban como retransmisores del mensaje (escenario con dos saltos), en el escenario 4, el dispositivo Z necesitaba cuatro saltos. Los resultados presentados en la Figura 3-8 muestran claramente la significativa

reducción del  $Data\_Ch\_Usage$  asociada al aumento del número de saltos necesarios hasta alcanzar el destino. Las mismas tendencias que en el caso de realizar una reasociación fueron observadas en el caso de que el dispositivo Z realizara un traspaso, si bien se obtuvieron valores de  $Data\_Ch\_Usage$  superiores.

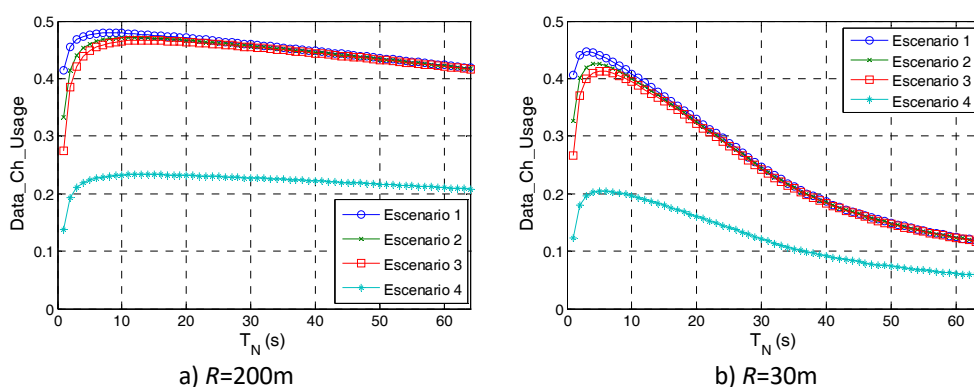


Figura 3-8.  $Data\_Ch\_Usage$  en función de  $T_N$  para los diferentes escenarios cuando Z realiza una reasociación y  $v=3\text{m/s}$  [17].

El análisis realizado también evaluó la probabilidad de realizar un traspaso o una reasociación. Para ello, se determinó si el dispositivo móvil era capaz de detectar al dispositivo estático al cual se dirigía en el intervalo de tiempo en que estaba bajo cobertura del mismo. La Tabla 3-2 muestra los resultados obtenidos para distintos valores de velocidad del dispositivo móvil y de rangos de cobertura. Los resultados muestran que a altas velocidades y rangos de comunicación pequeños se reduce el tiempo que el dispositivo móvil está bajo cobertura simultánea de los dispositivos A y B ( $t_{eAB}$ ). Al reducir este tiempo, se reduce también la probabilidad de que el dispositivo Z y el dispositivo B puedan detectarse a tiempo para poder realizar un traspaso antes de que Z abandone el rango de cobertura del dispositivo A. Por otro lado, los resultados obtenidos también muestran que la probabilidad de detección está altamente influenciada por la duración de la supertrama. Tal y como se presenta en la Tabla 3-2, la duración de la supertrama de gestión recomendada por WirelessHART (64 segundos) presenta probabilidades de detección relativamente pequeñas, mientras que la probabilidad de detección aumenta si la duración de la supertrama de gestión se reduce.

Tabla 3-2. Probabilidad de detección entre los dispositivos Z y B durante  $t_{eAB}$  [17].

$R(\text{m})$	$v(\text{m/s})$	$t_{eAB}(\text{s})$	$T_N=1\text{s}$	$T_N=4\text{s}$	$T_N=16\text{s}$	$T_N=64\text{s}$
200	1	200	0.999	0.999	0.973	0.593
200	3	66.6	0.999	0.992	0.698	0.259
30	1	30	0.999	0.884	0.417	0.126
30	3	10	0.944	0.513	0.165	0.044

El análisis realizado también demostró que el tiempo de transmisión de origen a destino y el gasto de energía (en proceso de gestión y acceso) dependen del escenario considerado (número de dispositivos desplegados y saltos del paquete de datos hasta el *Gateway*). En particular, se comprobó que en escenarios con mayor número de dispositivos se incrementa el tiempo de transmisión a causa del aumento del tiempo empleado en la gestión (durante ese tiempo solo se podían transmitir paquetes de gestión). Además, se comprobó la existencia de duraciones de supertrama de gestión, inferiores a los 64 segundos recomendados por WirelessHART, que minimizaban el consumo de energía por parte del dispositivo móvil (Figura 3-9).

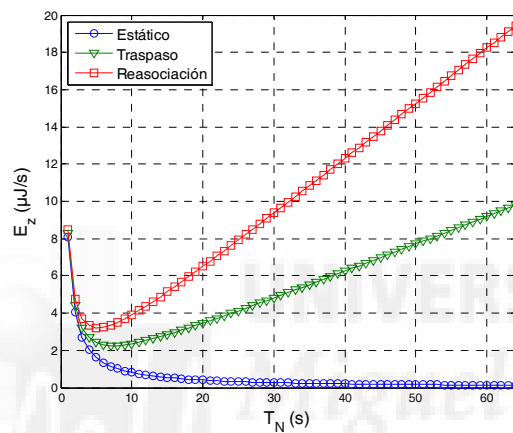


Figura 3-9. Energía empleada por el dispositivo Z en función de  $T_N$  (escenario 1,  $v=1\text{m/s}$  y  $R=200\text{m}$ ).

A modo de resumen, los resultados obtenidos en [17] demostraron que incluso en escenarios relativamente simples los mecanismos de gestión presentes en WirelessHART no son adecuados para gestionar de un modo eficiente la movilidad de los dispositivos de la red. El estudio demostró que la movilidad de los dispositivos tiene un efecto muy negativo en la sobrecarga de señalización, ya que los continuos traspasos y/o reasociaciones requieren de una continua actualización del estado de la red (tablas de rutas, asignaciones de enlaces de comunicación, etc.) que debe ser enviada no solo al dispositivo móvil, sino también al resto de dispositivos que integran la red. La investigación llevada a cabo en [17] permitió detectar valores óptimos de funcionamiento y configuración de WirelessHART para soportar la movilidad de los dispositivos, además de detectar posibles mejoras en la gestión de la red para garantizar los esperados niveles de fiabilidad y retardo de las redes de comunicaciones industriales. Del estudio realizado quedó patente la necesidad de investigar mecanismos que reduzcan el tiempo empleado en el acceso de un dispositivo a la red y en la detección de

dispositivos vecinos. Además, se puso de manifiesto que el rendimiento de las comunicaciones inalámbricas industriales podría incrementarse si los mecanismos que gestionan la supertrama de gestión pudieran realizar una configuración dinámica de su duración en base a, por ejemplo, el tiempo de permanencia esperado del dispositivo móvil bajo la cobertura de la red.

### **3.2 Impacto de la movilidad en la fiabilidad *end-to-end***

El estudio presentado en el apartado 3.1 se ha extendido en el marco de esta tesis doctoral con un análisis del impacto de la movilidad en la fiabilidad *end-to-end*. El objetivo es analizar con más detalle el rendimiento *end-to-end* de WirelessHART en diferentes condiciones de operación cuando se consideran dispositivos móviles.

Para comprender mejor cómo la movilidad puede afectar a la fiabilidad *end-to-end*, es necesario recordar que el estándar WirelessHART especifica ciertas normas de cómo se han de determinar y asignar las rutas y los enlaces de comunicación empleados en las comunicaciones, aunque también deja cierta libertad en su implementación. El *Network Manager* ha de asignar los enlaces de comunicación, asignando al menos dos enlaces de comunicación dedicados por cada salto de la ruta principal y un enlace por cada salto de una ruta secundaria, si existe. Una vez que el *Network Manager* ha determinado las rutas y los enlaces de comunicación asignados, dicha asignación es mantenida normalmente hasta que cambian los requisitos de tráfico de los dispositivos de la red, o hasta que cambian las condiciones de propagación y los requisitos de fiabilidad proporcionados son inferiores a los demandados por la aplicación. Sin embargo, en redes con dispositivos móviles es necesario realizar continuamente nuevas asignaciones de rutas y enlaces de comunicación debido al movimiento del dispositivo móvil.

Esta tesis doctoral ha investigado el impacto de la movilidad en la fiabilidad *end-to-end* a través del análisis de las técnicas utilizadas para asignar rutas y enlaces de comunicación por el *Network Manager*, y de la periodicidad con la que el *Network Manager* es capaz de determinar y programar una nueva asignación de rutas y enlaces de comunicación. Esta periodicidad es un parámetro importante porque una vez asignadas las rutas y los enlaces de comunicación, éstos han de mantenerse al menos dicho periodo de tiempo, aunque la calidad de los enlaces de comunicación podría variar más rápidamente en condiciones de movilidad.

### 3.2.1 Escenario y condiciones de evaluación

#### Escenario

El escenario considerado para la evaluación de la fiabilidad *end-to-end* está formado por 8 dispositivos estáticos, desplegados según se presenta en la Figura 3-10, y un dispositivo móvil. Este escenario ha sido seleccionado por ser un escenario sencillo con dispositivos estáticos situados a distinto número de saltos del *Gateway*. El dispositivo móvil se desplaza según el modelo de movilidad *Random WayPoint* (RWP). El modelo de movilidad RWP es un modelo sintético comúnmente usado donde cada dispositivo se desplaza en línea recta desde una posición  $P_i$  hasta una posición  $P_{i+1}$ . Cuando el dispositivo alcanza la posición  $P_{i+1}$ , se dirige hacia una nueva posición  $P_{i+2}$  aleatoriamente escogida con igual probabilidad dentro del conjunto de posiciones que conforman el área por el cual se puede desplazar el dispositivo móvil. En el escenario empleado, el dispositivo móvil se desplaza dentro de un área cuadrada de  $3d$  de lado (área sombreada en la Figura 3-10), siendo  $d$  una variable que representa la separación entre dos dispositivos estáticos vecinos. El estudio realizado ha considerado una velocidad de desplazamiento del dispositivo móvil constante para cada prueba, y se ha analizado la fiabilidad para velocidades de desplazamiento entre 0.5m/s y 5m/s.

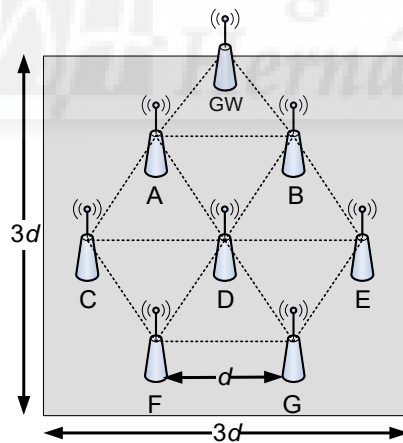


Figura 3-10. Despliegue de dispositivos estáticos y área de desplazamiento del dispositivo móvil.

El dispositivo móvil genera un paquete de datos por segundo, y se considera que la duración de la supertrama de datos es de 1 segundo ( $T_D=1s$ ). Este estudio considera una gestión ideal de la red en la que el *Network Manager* tiene en todo momento conocimiento de la calidad de los enlaces de comunicación entre todos los dispositivos de la red, y en la que se considera que los cambios de asignación de rutas y enlaces de comunicación son distribuidos a todos los dispositivos de la red sin errores y en un



tiempo despreciable. El análisis realizado también considera que la asignación de rutas y enlaces de comunicación solamente puede ser realizada cada  $T_R$  segundos. De esta forma, el estudio realizado ha investigado el impacto de la variación de  $T_R$  sobre la fiabilidad *end-to-end* de las comunicaciones de un dispositivo móvil.

#### Modelo de propagación

El estudio considera un modelo de propagación radio que modela de forma logarítmica las pérdidas de propagación con la distancia entre transmisor y receptor, e incorpora el efecto producido por la presencia de obstáculos (*shadowing*) mediante una distribución aleatoria log-normal [25]. De acuerdo a este modelo, las pérdidas por propagación en dB a una determinada distancia  $d$  en metros vienen definidas por:

$$PL(d) = PL(d_0) + 10 \cdot n \cdot \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma \quad (3-6)$$

donde  $PL(d_0)$  representa las pérdidas por propagación en dB a una distancia de referencia  $d_0$ ,  $n$  representa el exponente de las pérdidas de propagación, y  $X_\sigma$  representa una variable aleatoria con distribución log-normal que modela el efecto *shadowing*. El modelo de propagación radio empleado hace uso de los valores de  $PL(d_0)$ ,  $n$  y  $\sigma$  presentados en la Tabla 3-3, obtenidos a partir de medidas reales para tres condiciones de propagación en un entorno industrial a 2400 MHz [26]. Las tres condiciones considerados en [26] son representados en la Figura 3-11: visión directa (*LOS, Line-Of-Sight*), visión levemente obstruida (*OBS light, OBstructed line-of-Sight light*), y visión fuertemente obstruida (*OBS heavy, OBstructed line-of-Sight heavy*). Se considera también el caso en el que se experimentan las tres condiciones de propagación en un mismo escenario industrial (*All topographies*).

Tabla 3-3. Parámetros del modelo de propagación [26] bajo diferentes condiciones de propagación.

	$PL(d_0)$ [dB]	$n$ [-]	$\sigma$ [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

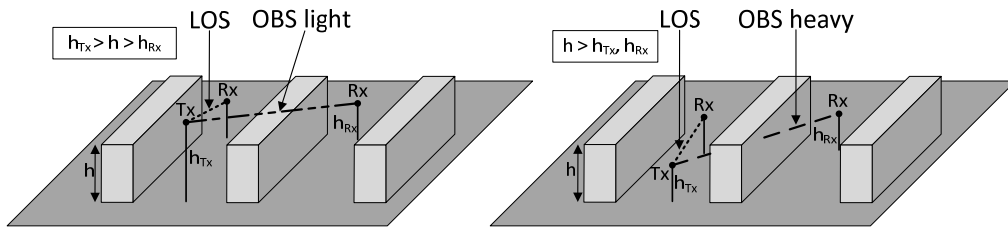


Figura 3-11. Condiciones de propagación definidas en [26] para escenarios industriales.

A partir de un determinado valor de potencia de transmisión ( $P_{Tx}$ ) y considerando las pérdidas por distancia,  $PL(d)$ , es posible estimar en (3-7) 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  $N$ , es posible estimar el SNR (*Signal-to-Noise Ratio*) según (3-8). Al emplear un transceptor radio compatible con el estándar IEEE 802.15.4-2006 [13], es posible obtener en (3-9) el BER (*Bit Error Rate*) a partir del SNR. Finalmente, con este BER es posible estimar en (3-10) la PDR (*Packet Delivery Ratio*) de un paquete de  $B$  bytes. Estas ecuaciones son las sugeridas en el propio estándar IEEE 802.15.4-2006 [13] para la estimación de la PDR a partir del nivel de SNR cuando las distancias están expresadas en metros.

$$RSS(d) = P_{Tx} - PL(d) \quad (3-7)$$

$$SNR(d) = RSS(d) - N \quad (3-8)$$

$$BER(d) = \frac{8}{15} \times \frac{1}{16} \times \sum_{k=2}^{16} (-1)^k \binom{16}{k} e^{\left(20 \times SNR(d) \times \left(\frac{1}{k} - 1\right)\right)} \quad (3-9)$$

$$PDR(d) = (1 - BER(d))^{8 \cdot B} \quad (3-10)$$

En la Figura 3-12 se presenta, a modo de ejemplo, la PDR 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 una de las 4 condiciones de propagación consideradas en la Tabla 3-3 en presencia de una potencia de ruido de  $N = -90$  dBm.

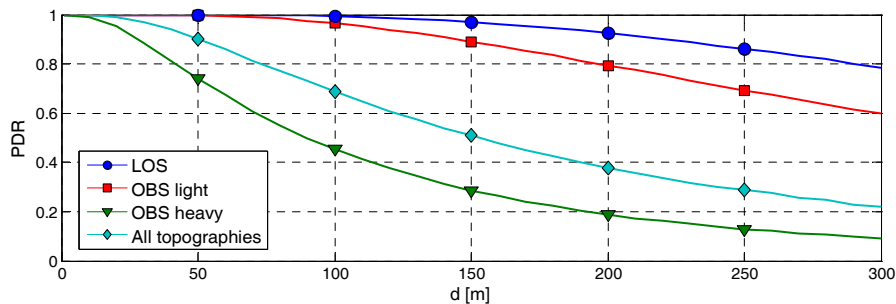


Figura 3-12. PDR media en función de la distancia entre el emisor y el receptor ( $P_{Tx} = 3$  dBm,  $N = -90$  dBm y  $B = 133$  bytes).

Asignación de enlaces de comunicación y rutas

La fiabilidad *end-to-end* depende en buena medida de la ruta completa empleada en la transmisión de paquetes de datos entre el dispositivo móvil (origen) y el *Gateway* (destino). En este estudio se han evaluado dos técnicas de asignación de enlaces de comunicación y rutas, propuestas en el marco de esta tesis, que serán referidas como *Ruta* y *Salto*. En la técnica identificada como *Ruta*, el *Network Manager* escoge la ruta con mayor fiabilidad *end-to-end* de entre todas las posibles rutas entre el dispositivo móvil y el *Gateway*. En la técnica identificada como *Salto*, el *Network Manager* escoge como primer salto de la ruta entre el dispositivo móvil y el *Gateway*, el salto que presente la mayor PDR<sup>4</sup>. Una vez determinado el primer salto de la ruta, para determinar el resto de saltos, se escoge aquella ruta que presente la mayor fiabilidad *end-to-end* de entre todas las posibles rutas entre el dispositivo escogido como primer salto y el *Gateway*.

Cada técnica de asignación de enlaces de comunicación y rutas es evaluada considerando un primer caso en que hay dos enlaces de comunicación por cada salto de la ruta principal, y un enlace de comunicación por cada salto de la ruta secundaria; este caso es identificado como *Ruta<sub>2+1</sub>* y *Salto<sub>2+1</sub>* para las técnicas *Ruta* y *Salto*, respectivamente. En un segundo caso solamente se consideran dos enlaces de comunicación por cada salto de la ruta principal; este caso es identificado como *Ruta<sub>2+0</sub>* y *Salto<sub>2+0</sub>* para las técnicas *Ruta* y *Salto*, respectivamente. En ambos casos, la asignación de los enlaces de comunicación de un determinado salto en cada ruta se realiza antes de la asignación de los enlaces de comunicación del siguiente salto en esa misma ruta. Además, al menos el primer salto de la ruta principal y de la ruta secundaria es distinto<sup>5</sup>.

La Figura 3-13 muestra a modo de ejemplo las rutas utilizadas por las distintas técnicas (*Ruta<sub>2+1</sub>*, *Ruta<sub>2+0</sub>*, *Salto<sub>2+1</sub>* y *Salto<sub>2+0</sub>*) para la transmisión de los paquetes de datos entre el dispositivo móvil (origen) y el *Gateway* (destino) para el despliegue de dispositivos de la Figura 3-10. En este ejemplo se observa cómo las técnicas *Ruta<sub>2+1</sub>* y

---

<sup>4</sup> Bajo el escenario y las asunciones consideradas, la técnica *Salto* escogería como primer salto al dispositivo más cercano al dispositivo móvil.

<sup>5</sup> La ruta secundaria solo es utilizada en el caso de que la transmisión en la ruta principal falle en el primer salto. Una vez el dispositivo móvil transmite correctamente el paquete de datos al primer dispositivo estático de la red, la ruta secundaria no es utilizada. Esto es consecuencia de que el dispositivo origen no tiene conocimiento de si el paquete ha sido o no retransmitido correctamente en los posteriores saltos.

$Ruta_{2+0}$ , priman escoger rutas con un menor número de saltos aunque ello suponga realizar transmisiones entre dispositivos más separados (y por lo tanto con menor PDR) que las técnicas  $Salto_{2+1}$  y  $Salto_{2+0}$ .

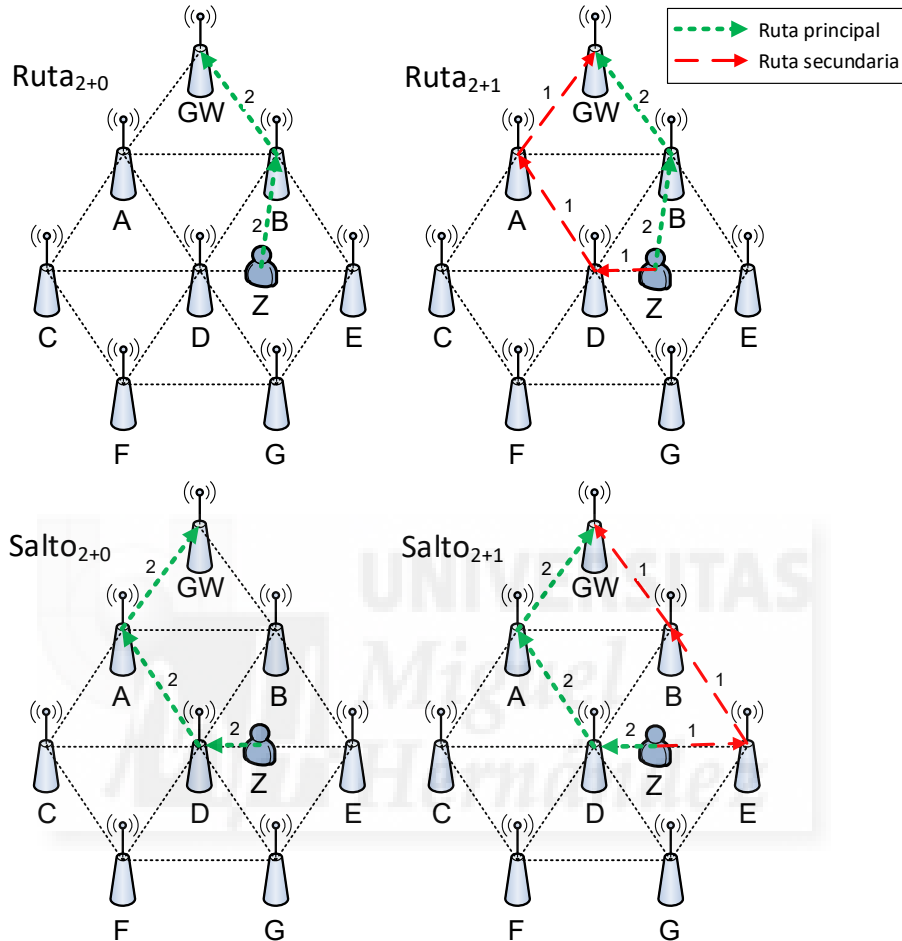


Figura 3-13. Ejemplo de enlaces de comunicación utilizados por *Ruta* y *Salto* para la transmisión de los paquetes de datos entre el dispositivo móvil (origen) y el *Gateway* (destino).

La Figura 3-14 muestra la asignación de enlaces de comunicación realizada por las distintas técnicas ( $Ruta_{2+0}$ ,  $Ruta_{2+1}$ ,  $Salto_{2+0}$  y  $Salto_{2+1}$ ) para las rutas de la Figura 3-13. El color de los enlaces de comunicación representa la ruta a la que están asignados. Los enlaces de comunicación asignados a la ruta principal, ubicados al principio la supertrama de datos, están representados en verde. Los enlaces de comunicación asignados a la ruta secundaria, ubicados tras los enlaces de comunicación asignados a la ruta secundaria en la técnica  $Ruta_{2+1}$  y  $Salto_{2+1}$ , están representados en rojo. En la Figura 3-14, el *slot* dentro de supertrama de datos (con periodicidad  $T_D$ ) está indicado debajo de cada enlace de comunicación. En este caso se observa, tal y como se había

comentado, que la asignación de los enlaces de comunicación de un determinado salto en cada ruta se realiza antes de la asignación de los enlaces de comunicación del siguiente salto en esa misma ruta.

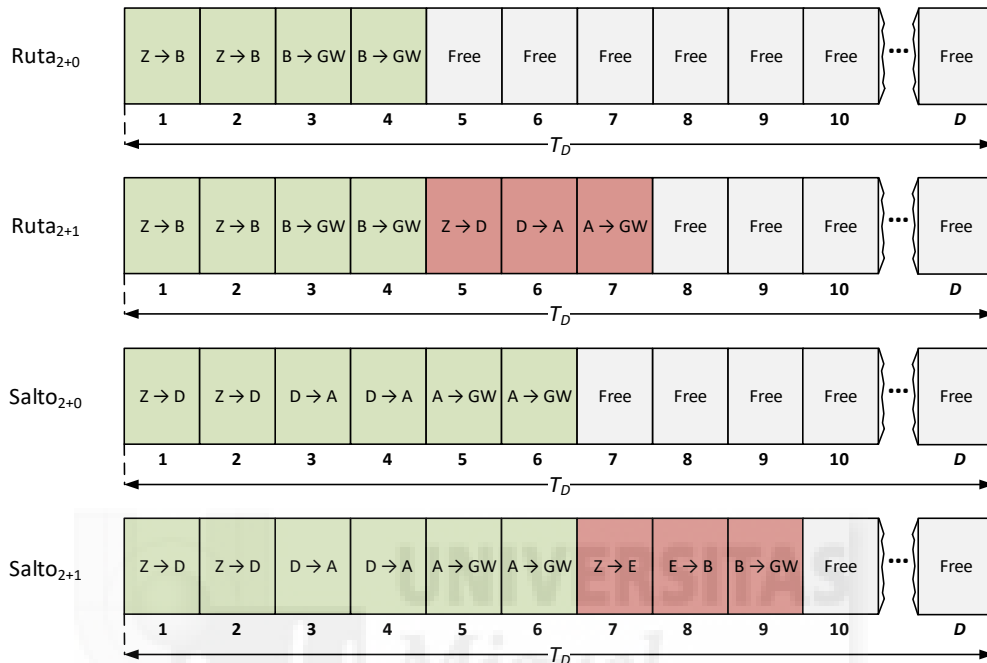


Figura 3-14. Asignación de enlaces de comunicación realizada por las distintas técnicas ( $Ruta_{2+0}$ ,  $Ruta_{2+1}$ ,  $Salto_{2+0}$  y  $Salto_{2+1}$ ) para las rutas de la Figura 3-13.

Métrica de fiabilidad

Se define la fiabilidad *end-to-end*, como la probabilidad de que un paquete originado por el dispositivo móvil evaluado sea correctamente recibido por el dispositivo destino, cuando se emplean las rutas y los enlaces de comunicación establecidos por el *Network Manager*. La fiabilidad *end-to-end* es obtenida en función de las rutas escogidas entre origen y destino, la *PDR* de cada salto, y el número de enlaces de comunicación asignados en cada salto en cada ruta. Cuando todos los enlaces de comunicación de un determinado salto son asignados después del salto anterior, la fiabilidad *end-to-end* es igual al producto de la fiabilidad de cada salto [27]. La fiabilidad de un salto cuando se disponen de  $L$  enlaces de comunicación (intentos para transmitir el paquete) puede ser estimada a partir de la *PDR* del salto como:

$$Fiabilidad = 1 - (1 - PDR)^L \tag{3-11}$$

La fiabilidad *end-to-end* de los casos *Ruta<sub>2+0</sub>* y *Salto<sub>2+0</sub>* puede pues ser estimada como:

$$Fiabilidad_{end-to-end} = \prod_{h_p=1}^{H_p} \left(1 - \left(1 - PDR_{h_p}\right)^{L_p}\right) \quad (3-12)$$

donde  $H_p$  representa el número de saltos en la ruta principal,  $L_p=2$  representa el número de enlaces de comunicación asignados en cada salto de la ruta principal, y  $PDR_{h_p}$  es la *PDR* del salto  $h_p$ , que puede ser estimada a partir de la ecuación presentada en (3-10) para la *PDR* en función de la distancia.

La fiabilidad *end-to-end* para *Ruta<sub>2+1</sub>* y *Salto<sub>2+1</sub>* puede ser estimada como:

$$Fiabilidad_{end-to-end} = \left( \prod_{h_p=1}^{H_p} \left(1 - \left(1 - PDR_{h_p}\right)^{L_p}\right) \right) + \left( \left(1 - PDR_{1_p}\right)^{L_p} \prod_{h_s=1}^{H_s} \left(1 - \left(1 - PDR_{h_s}\right)^{L_s}\right) \right) \quad (3-13)$$

donde  $H_s$  representan el número de saltos en la ruta secundaria,  $L_s=1$  representa el número de enlaces de comunicación asignados en cada salto de la ruta principal, y  $PDR_{h_s}$  es la *PDR* del salto  $h_s$ , que puede ser estimada a partir de la ecuación (3-10). El hecho de que la ruta secundaria solo sea utilizada en el caso de que la transmisión en la ruta principal falle en el primer salto, se ve reflejado en la ecuación (3-13) a través del factor  $\left(1 - PDR_{1_p}\right)^{L_p}$ , que corresponde a la probabilidad de que la transmisión falle en todos los intentos del primer salto de la ruta principal.

### 3.2.2 Evaluación

La Figura 3-15 muestra a modo de ejemplo los resultados correspondientes a un fragmento de una de las simulaciones realizadas para evaluar la fiabilidad *end-to-end* entre el dispositivo móvil y el *Gateway*. Los resultados se corresponden a los obtenidos con la técnica *Ruta<sub>2+1</sub>* cuando se consideran unas condiciones de propagación *LOS* entre los dispositivos estáticos, condiciones de propagación *All topographies* entre el dispositivo móvil y los dispositivos estáticos, y  $v=3m/s$ ,  $d=150m$  y  $B=133 bytes$ <sup>6</sup>. La Figura 3-15a presenta la evolución temporal del dispositivo al que el dispositivo móvil se conecta en el primer salto de la ruta principal. La Figura 3-15b presenta la evolución

<sup>6</sup> Estas condiciones de propagación radio se suelen dar en un entorno industrial en el que los dispositivos estáticos están ubicados en el techo y tienen visión directa entre ellos, y el dispositivo móvil es transportado por una persona o un vehículo industrial a una altura considerablemente más baja que los elementos dispuestos en el entorno.

temporal de la fiabilidad *end-to-end*, y la Figura 3-15c presenta la trayectoria seguida por el dispositivo móvil en el fragmento de prueba ilustrado. Los resultados obtenidos en este ejemplo muestran por un lado que reconfigurar las rutas y los enlaces de comunicación cada segundo ( $T_R=1s$ ) evita la caída de la fiabilidad *end-to-end* que se observa con  $T_R=64s$ . La Figura 3-15a muestra también que poder reconfigurar las rutas y los enlaces de comunicación cada segundo ( $T_R=1s$ ) supone un alto número de cambios en las asignaciones de los enlaces de comunicación.

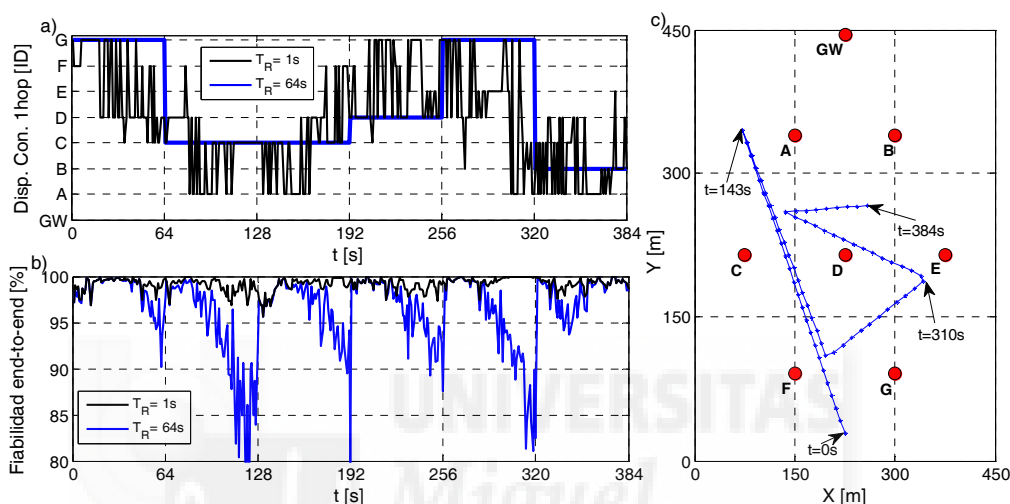


Figura 3-15. Ejemplo de análisis de fiabilidad *end-to-end* considerando  $T_R=1s$ ,  $T_R=64s$ ,  $v=3$  m/s,  $B=133$  bytes,  $d=150m$ , y  $Ruta_{2+1}$ . Evolución temporal del dispositivo al que el dispositivo móvil está conectado (a). Evolución temporal de la fiabilidad *end-to-end* (b). Trayectoria seguida por el dispositivo móvil (c).

La Figura 3-16 representa la fiabilidad *end-to-end* en función de la velocidad del dispositivo móvil para  $Ruta_{2+1}$  y  $Ruta_{2+0}$ , diferentes valores de  $T_R$ , condiciones de propagación *LOS*,  $B=26$  bytes y  $d=150m$ . Los resultados obtenidos para  $Ruta_{2+0}$  muestran una disminución significativa de la fiabilidad *end-to-end* al incrementar la velocidad del dispositivo móvil para valores de  $T_R$  superiores a  $T_D$ , esto es, para valores de  $T_R$  superiores a 1 segundo. Los resultados también muestran que en el caso de considerar una ruta secundaria además de la principal ( $Ruta_{2+1}$ ), no solo se incrementa la fiabilidad *end-to-end* con respecto a no considerar una ruta secundaria ( $Ruta_{2+0}$ ), sino que la movilidad afecta en menor medida a la fiabilidad *end-to-end*.

La Figura 3-17 muestra que se observan las mismas tendencias para el caso de las técnicas  $Salto_{2+1}$  y  $Salto_{2+0}$ . Sin embargo,  $Salto_{2+1}$  y  $Salto_{2+0}$  resultan en una reducción de la fiabilidad *end-to-end* con respecto a  $Ruta_{2+1}$  y  $Ruta_{2+0}$ . Esta reducción es consecuencia

de que la técnica *Salto* antepone escoger rutas con mayor calidad en el primer salto, aunque ello suponga utilizar rutas con mayor número de saltos. Los resultados obtenidos muestran que esta anteposición reduce la fiabilidad *end-to-end* respecto a la técnica *Ruta*.

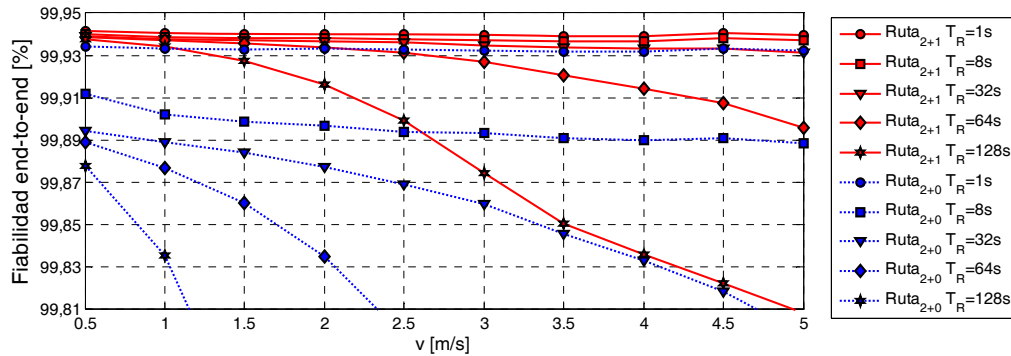


Figura 3-16. Fiabilidad *end-to-end* de las técnicas  $Ruta_{2+1}$  y  $Ruta_{2+0}$  en función de  $v$  para distintos valores de  $T_R$  bajo unas condiciones de propagación *LOS* con  $d=150m$  y  $B=26$  bytes.

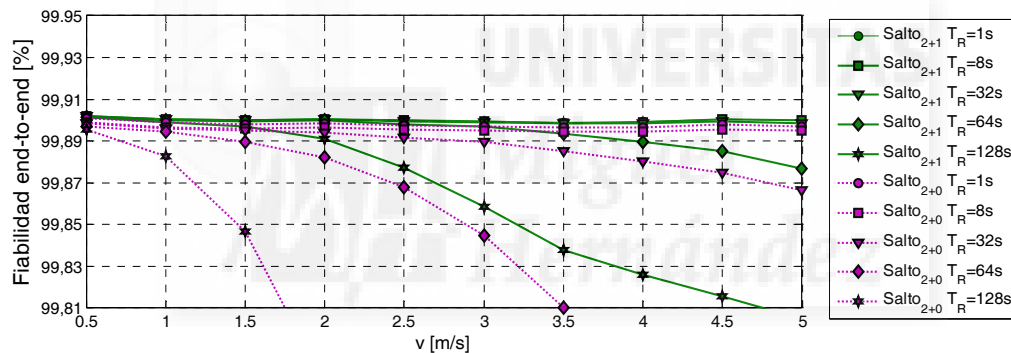


Figura 3-17. Fiabilidad *end-to-end* de las técnicas  $Salto_{2+1}$  y  $Salto_{2+0}$  en función de  $v$  para distintos valores de  $T_R$  bajo unas condiciones de propagación *LOS* con  $d=150m$  y  $B=26$  bytes.

La Figura 3-18 muestra la fiabilidad *end-to-end* en función de la velocidad del dispositivo móvil para la técnica  $Ruta_{2+1}$  cuando las condiciones de propagación entre el dispositivo móvil y los dispositivos estáticos de la red son las correspondientes a *All topographies* [26], y las condiciones entre dispositivos estáticos son *LOS* o *All topographies*. Como era de esperar, las condiciones de propagación *All topographies* entre los dispositivos estáticos resultan en una reducción de la fiabilidad *end-to-end* con respecto a las condiciones de propagación *LOS*. El aumento de la velocidad de desplazamiento del dispositivo móvil degrada en general la fiabilidad *end-to-end*, especialmente para elevados valores de  $T_R$ .



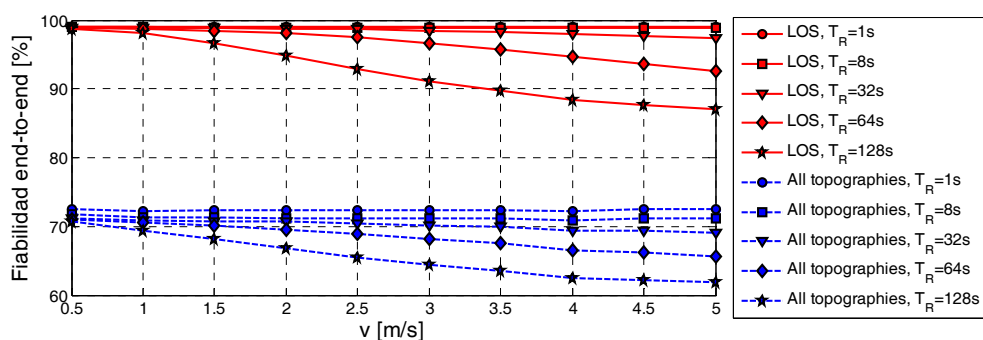


Figura 3-18. Fiabilidad *end-to-end* de la técnica  $Ruta_{2+1}$  en función de  $v$  para distintos valores de  $T_R$  bajo diferentes condiciones de propagación entre los dispositivos estáticos,  $d=150m$  y  $B=26$  bytes.

La Figura 3-19 representa la fiabilidad *end-to-end* de las diferentes técnicas de enrutamiento evaluadas en función del tamaño del paquete de datos ( $B$ ) bajo unas condiciones de propagación *LOS* entre todos los dispositivos,  $d=100m$ ,  $v=3m/s$  y  $T_R=1s$ . Como se puede observar, aumentar el tamaño del paquete ( $B$ ) reduce la fiabilidad *end-to-end*.

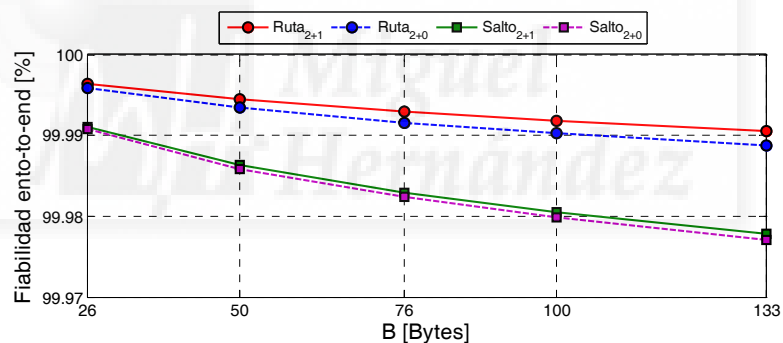


Figura 3-19. Fiabilidad *end-to-end* en función de  $B$  bajo condiciones de propagación *LOS*,  $d=100m$ ,  $v=3$  m/s y  $T_R=1s$ .

Finalmente, la Figura 3-20 muestra la fiabilidad *end-to-end* de  $Ruta_{2+1}$  y  $Salto_{2+1}$  en función de  $d$  (separación entre los dispositivos estáticos) para diferentes condiciones de propagación,  $B=26$  bytes,  $v=3m/s$  y  $T_R=1s$ . Los resultados vuelven a confirmar que la fiabilidad *end-to-end* obtenida por  $Ruta_{2+1}$  es mayor a la obtenida por  $Salto_{2+1}$ . La figura muestra que la fiabilidad *end-to-end* se reduce para ambas técnicas al aumentar la separación entre los dispositivos ( $d$ ), y que la fiabilidad *end-to-end* depende en gran medida de las condiciones de propagación radio entre dispositivos.

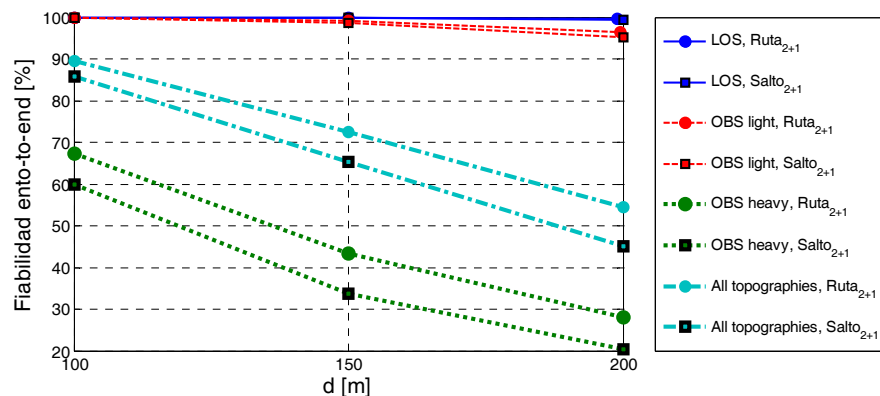


Figura 3-20. Fiabilidad *end-to-end* en función de  $d$  para diferentes condiciones de propagación,  $B=26$  bytes,  $v=3$  m/s y  $T_R=1$ s.

El análisis presentado en esta sección ha demostrado la degradación de la fiabilidad *end-to-end* de las comunicaciones WirelessHART al introducir dispositivos móviles. En particular, los resultados han demostrado que el empleo de tiempos de reconfiguración mayores a la periodicidad del envío de los paquetes de datos resulta en una reducción de la fiabilidad *end-to-end* al reducir la capacidad de modificar la ruta y los enlaces de comunicación en base a la calidad de la conexión del dispositivo móvil. Además, 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 los dispositivos estáticos, la técnica de enrutamiento, la asignación de enlaces de comunicación, o las condiciones de propagación radio.

### 3.3 Conclusiones

Este capítulo ha demostrado que los actuales estándares inalámbricos industriales en general, y el estándar WirelessHART en particular, carecen de mecanismos que soporten de forma eficiente la movilidad de los dispositivos a la vez que se garantiza la fiabilidad de las comunicaciones. El estudio llevado a cabo ha demostrado que incluso en escenarios relativamente simples los mecanismos de gestión presentes en WirelessHART no son adecuados para gestionar de un modo eficiente la movilidad de los dispositivos de la red, los cuales pueden perder frecuentemente la conectividad. Los resultados obtenidos también muestran que el empleo de tiempos de reconfiguración elevados puede reducir la fiabilidad *end-to-end* al no poder modificarse de forma suficientemente rápida la ruta y los enlaces de comunicación. El análisis llevado a cabo ha puesto en evidencia que la técnica de asignación de rutas y enlaces de comunicación y las

condiciones de operación (propagación, velocidad de desplazamiento, etc.) tienen también una notable influencia sobre la fiabilidad *end-to-end* de las comunicaciones inalámbricas industriales.

Los resultados obtenidos en este capítulo han servido para identificar tres retos y líneas de investigación que permitirían mejorar el soporte a la movilidad en las futuras redes inalámbricas industriales: el acceso de un dispositivo móvil a la red tras la pérdida de la conectividad con la red, la detección de nuevos dispositivos vecinos, y la gestión dinámica de las rutas y los enlaces de comunicación.

Los actuales estándares industriales, como WirelessHART, especifican el proceso que ha de realizarse cuando un dispositivo accede a la red por primera vez. Este proceso incluye desde la configuración previa (asignar el identificador de la red a la que solicitar el acceso y la clave de seguridad a emplear en dicho proceso), hasta la asignación de los enlaces de comunicación y las rutas utilizadas tanto en la gestión como en el envío de los datos (ver apartado 2.5.1). Dado que los estándares inalámbricos industriales, como WirelessHART, han sido diseñados principalmente para dar soporte a dispositivos estáticos, en el caso de que dispositivos móviles pierdan la conectividad con la red deben utilizar mecanismos de acceso a la red relativamente lentos para volver a ser reconfigurados. En este contexto, resultaría interesante disponer de mecanismos más ágiles de acceso a la red por parte de dispositivos móviles tras la pérdida de conectividad. Por ejemplo, estos mecanismos podrían tener en cuenta que el dispositivo ya conoce el identificador de la red, los canales de frecuencia utilizados, y dispone de una clave de sesión válida que puede utilizar para que el *Network Manager* le asigne nuevos enlaces de comunicación para comunicarse con la red.

El segundo reto identificado es el descubrimiento y la gestión de los dispositivos con conectividad directa, también conocidos como dispositivos vecinos. La movilidad de los dispositivos supone una constante variación de los dispositivos que se encuentran en el rango de cobertura de los dispositivos móviles. Esta circunstancia supone que el tiempo en el que se puede realizar la comunicación entre el dispositivo móvil y otro dispositivo pueda estar limitado. En despliegues con dispositivos estáticos, la conectividad entre dos dispositivos cambia principalmente cuando se introduce o se retira un elemento obstructor entre dos dispositivos, situación que sucede con una baja frecuencia y normalmente solo afecta a la conectividad con alguno de los dispositivos vecinos. Sin embargo, en despliegues con dispositivos móviles los cambios son mucho más frecuentes y críticos. En este contexto, resultaría interesante disponer de mecanismos que permitan detectar a otros dispositivos con conectividad lo suficientemente rápido

como para permitir que el *Network Manager* pueda establecer una nueva asignación de enlaces de comunicación y de rutas que evite que el dispositivo móvil se desconecte de la red al desplazarse y cambiar sus dispositivos vecinos.

El tercer reto identificado es la necesidad de mejorar la capacidad de la red para gestionar los enlaces de comunicación y las rutas asignados para la comunicación entre los dispositivos de la red. En despliegues de dispositivos estáticos, el *Network Manager* realiza una asignación inicial de las rutas y enlaces de comunicación que cumple los requisitos de fiabilidad, retardo y periodicidad de todas las comunicaciones en la red. Esta asignación, que generalmente considera el empleo de rutas redundantes, se mantiene invariable a lo largo del tiempo, salvo que cambios en la conectividad con algún dispositivo vecino o un cambio en el tráfico de los paquetes de datos impliquen realizar ciertas modificaciones sobre la asignación previa realizada. La introducción de dispositivos móviles lleva asociada un incremento de la variación de las rutas y los enlaces de comunicación empleados por éstos para hacer llegar sus paquetes de datos al destino. Además, es importante destacar que el *Network Manager* asigna un enlace de comunicación entre cada par de dispositivos de cada uno de los saltos de las rutas establecidas, de forma que cambios en las rutas se traducen también en cambios en la asignación de los enlaces de comunicación empleados por los diferentes dispositivos de la red. Es por ello que resultaría interesante disponer de nuevos y eficientes mecanismos de asignación de rutas y enlaces de comunicación que tengan en cuenta en su diseño la movilidad de los dispositivos.

De las tres líneas de investigación identificadas, la presente tesis doctoral ha abordado las correspondientes a la detección de nuevos dispositivos vecinos (capítulo 4), y la gestión dinámica de los enlaces de comunicación y las rutas (capítulos 5 y 6).

# 4

## Descubrimiento de vecinos

Industrial wireless networks can facilitate the deployment of a wide range of novel industrial applications [28], including mobile applications that connect mobile robots, vehicles, goods and workers to industrial networks. However, current industrial wireless standards have been mainly designed for static deployments, and their performance significantly degrades when introducing mobile devices. To solve this problem, the results obtained in chapter 3 demonstrate the need to design new mechanisms that reduce the time required to discover neighbor devices and the time to reconfigure the network. Adequate Neighbor Discovery Protocols (NDPs) that dynamically discover one-hop neighbors are necessary to reduce the probability of mobile devices to lose network connectivity and minimize the time to discover neighbors in case the connectivity is temporarily lost [9][29]. It is important to highlight that the discovery process can only be executed by devices that have previously joined the network. As a result, the NDPs are independent of the process followed by devices to join the network.

NDPs can be classified as probabilistic or deterministic [30]. Deterministic NDP schemes ensure a bounded discovery time. This is generally done by transmitting discovery packets on dedicated radio resources in order to avoid packet collisions. On the other hand, probabilistic NDP schemes are simpler to implement and require fewer radio resources and lower energy consumption for the discovery process. The NDP scheme included in WirelessHART is probabilistic, and cannot hence guarantee strict upper bounds on the discovery latency. This might not be critical when nodes are static

and maintain the same neighbors for long periods of time. However, the capacity to rapidly detect neighbors is critical when considering mobile devices. In this context, this chapter proposes three novel NDP schemes that improve the neighbor discovery process under the presence of mobile nodes in industrial wireless networks. The first proposal is LAN (Listen Adversite Network), a deterministic NDP scheme based on the idea of trying to listen DLPDUs transmitted by all other devices. However, rather than trying to listen DLPDUs on *Discovery Links*, LAN proposes listening for *Advertise* DLPDUs on the *Advertise Links*, since they are transmitted by all devices to facilitate new devices joining the network. The second proposal, LCA (Listen for Close Advertises), is a deterministic NDP scheme that evolves LAN to improve the radio resources consumed. To this aim, with LCA, each device only tries to receive *Advertise* DLPDUs from its one-hop and two-hop neighbors, thereby exploiting network topology information. The third proposal, LANm (Listen Advertise Network for mobile devices), combines the advantages of deterministic and probabilistic NDP policies. It does so by applying probabilistic policies for static devices, and deterministic ones for mobile devices. This approach helps reducing the discovery overhead while providing the necessary capacity for mobile nodes to detect neighbors. This study is conducted under the framework of the WirelessHART industrial standard, and the proposed NDP schemes do not affect other existing WirelessHART mechanisms such as the process followed by devices to join the network or the routing [10]. The obtained results demonstrate that the proposed schemes significantly improve the capacity of mobile devices to discover neighbors and the time needed to detect them compared to the existing WirelessHART NDP solution. These benefits are achieved, for some of the proposed NDP protocols, at the expense of increasing the number of radio resources utilized and the energy consumed in the discovery process compared to the current WirelessHART NDP process. The proposed solutions can also be adapted for the ISA100.11a and IEEE 802.15.4e standards since they maintain WirelessHART's passive listening scheme for neighbor discovery, and introduce a scanning scheme with active solicitations for the advertisements.

The chapter is organized as follows. Section 4.1 reviews the state of the art on neighbor discovery protocols in industrial wireless networks. Section 4.2 describes the proposed NDP schemes, and Section 4.3 defines the metrics utilized to evaluate their performance. Section 4.4 presents analytical performance models for the NDP schemes under evaluation, and Section 4.5 compares their performance through simulations. The main contributions and conclusions of this study are summarized in Section 4.6.

## 4.1 State of the art

Managing the mobility of nodes usually requires handover mechanisms that implement three different phases: information gathering, decision and execution. The information gathering phase is responsible for monitoring and collecting all context information. Based on the collected information, a handover decision would then be taken, including the selection of the new connecting node. Executing a handover can require, for example, changing the assigned frequency channel or time slot. NDP schemes are part of the information gathering phase, and are the focus of this study.

The study in [31] presents an excellent review of existing NDP schemes in wireless networks. All NDPs generally fall into two categories: probabilistic or deterministic [30]. In deterministic NDPs, nodes transmit discovery packets following a predefined schedule that guarantees a bounded discovery time [32]. Probabilistic NDPs cannot provide such guarantee since nodes transmit their discovery packets at randomly chosen times and packet collisions can be produced. On the other hand, probabilistic NDPs are simpler to implement and utilize fewer radio resources and lower energy consumption for the discovery process. The WirelessHART NDP scheme and the birthday protocol [33] are examples of probabilistic NDPs implemented over TDMA. With the birthday protocol [33], nodes can choose for each time slot dedicated to the discovery process whether they are in transmission, reception or sleep mode following predefined probabilities. WirelessHART does not employ the sleep mode, and each device goes into transmission mode after a random waiting time. To discover neighbors, WirelessHART requires devices to be in reception mode in all discovery slots in which they are not transmitting.

The time necessary to discover neighbors can be arbitrarily long in the case of probabilistic NDPs. Probabilistic NDPs might hence not be suitable for mobile networks that require a strict upper bound on discovery latency [34]. Deterministic NDP schemes are hence usually utilized by mobile devices for neighbor discovery [34]. For example, cellular systems use deterministic schemes to identify the base station to which a node should connect. Cellular networks periodically inform mobile terminals about the neighboring cells, and the mobiles perform radio measurements to identify whether they should change their serving base station [35]. Several deterministic NDPs explicitly or implicitly use brute force techniques to ensure the detection of neighbors before a given deadline [36]. In this case, nodes try to remain in reception mode as long as possible if they do not have any other packet to transmit. NDP schemes that use brute force are not very energy efficient. To reduce energy consumption, schemes such as those presented in [37] and [38] limit the number of time slots under which a node is in

reception mode to those where it is known that neighbor nodes can transmit discovery packets. In this case, the challenge is how to identify and inform each node about the time slots in which it has to be in reception mode to detect neighbors. The NDP scheme proposed in [37] predicts future contacts statistically using network science in order to reduce the energy consumption. The NDP scheme proposed in [38] uses reinforcement learning techniques to dynamically identify the time slots under which a node should be in reception mode. For improving the learning process, and to account for pattern variations, the NDP scheme in [38] also allows nodes to monitor other time slots.

Neighbor discovery is particularly challenging when devices can operate over multiple channels like it is the case of WirelessHART. Multi-channel neighbor discovery policies are also necessary when applying deterministic NDP schemes to standards that allow for the simultaneous use of several channels. The multi-channel NDP proposed in [39] operates with heterogeneous duty cycles and without clock synchronization. Another example is the McDisc proposal [40] that utilizes multiple available channels to establish a multi-channel neighbor discovery schedule that reduces energy consumption and increases the discovery reliability. Other relevant NDP schemes have been reported in [29], [32] and [36]. However, they cannot be directly applied in WirelessHART since [29] considers full-duplex technology, [32] divides each slot into two subslots, and [36] assumes that if two devices are awake during the same slots they can mutually discover each other.

As detailed in section 2.5.2, the WirelessHART neighbor discovery protocol (referred to as WH in this chapter) is based on the transmission and reception of *Keep-alive* sent by neighbor devices on a shared *Discovery Link*. The *Network Manager* includes at least one *Discovery Link* in each *Management Superframe* where each network device randomly selects to be in transmission or reception mode to send a *Keep-alive* DLPDU or listen to the possible transmission of a *Keep-alive* DLPDU from one of its neighbor devices. To this aim, a device first selects a random waiting time between 0 and *Discovery\_time*. When this time expires, the device transmits a *Keep-alive* DLPDU at the first available *Discovery Link*, and selects a new random waiting time to transmit the next *Keep-alive* DLPDU. In order to receive *Keep-alive* DLPDUs sent by neighbor nodes, the devices must be in reception mode in all *Discovery Links* in which they are not transmitting their own *Keep-alive* DLPDU. If a device receives a *Keep-alive* DLPDU from a device that was not previously identified as a neighbor, it stores it in its neighbor list and informs the *Network Manager*.



## 4.2 Neighbor discovery proposals

The neighbor discovery protocols proposed in this section are the first neighbor discovery protocols that considered the neighbor discovery challenge in WirelessHART networks that include mobile devices.

### 4.2.1 Listen Advertise Network

The first proposal is LAN (Listen Advertise Network), a deterministic neighbor discovery protocol designed to reduce the time needed to detect new neighbour devices and improve the neighbours' detection probability in WirelessHART. LAN is based on the idea of listening DLPDUs transmitted by other devices. However, rather than trying to listen *Keep-alive* DLPDUs on *Discovery Links* like the WH neighbor discovery protocol, LAN proposes listening for *Advertise* DLPDUs on the *Advertise Links*. This proposal is due to the fact that devices that are already part of the network are configured by the *Network Manager* to send *Advertise* DLPDUs to facilitate new devices joining the network. In fact, *Advertise* DLPDUs transmit information on how and when new devices should try accessing the network in *Advertise Links* dedicated to a single device, therefore avoiding potential collisions. As a result, this information can be valuable to improve the detection of neighbour devices. LAN does not change the process defined in WirelessHART for new devices to join the network, and does not modify the content of the *Advertise* DLPDUs or their transmission timing. Since *Advertise* DLPDUs are transmitted more frequently than *Keep-alive* DLPDUs, LAN can significantly reduce the average time needed to detect neighbor devices compared to WH. This is the case because one *Advertise* DLPDU is transmitted by each device in a dedicated link in each *Management Superframe*. On the other hand, *Keep-alive* DLPDUs are transmitted in links that are shared by all devices. LAN requires each device to be in reception mode in the links where the rest of network devices transmit their *Advertise* DLPDUs. The information about when all *Advertise Links* are scheduled is sent by the *Network Manager* to all network devices and needs to be sent also when the *Network Manager* changes one or more *Advertise Links*.

### 4.2.2 Listen for Close Advertisises

LAN can easily be implemented in WirelessHART, and it reduces the time needed to detect a neighbor device compared to WH. However, LAN does not maximize the utilization of radio resources nor minimize the energy consumption since all devices need to be in reception mode whenever a device transmits an *Advertise* DLPDU. This can be particularly inefficient when the device transmitting the *Advertise* DLPDU is

distant, and therefore the probability to receive the *Advertise* DLPDU is low. To overcome this inefficiency, this chapter also proposes the LCA (Listen for Close Advertises) protocol that can be integrated into WirelessHART. With LCA, each device only tries to receive *Advertise* DLPDUs from its one-hop and two-hop neighbors. To identify two-hop neighbors, LCA requires each device to transmit all its one-hop neighbors in its *Advertise* DLPDUs. The number of neighbors that can be listed in each *Advertise* DLPDU is limited by the number of bytes that can be transmitted in an *Advertise Link*. Several *Advertise* DLPDUs might then be necessary to transmit the complete list of one-hop neighbors. When a device receives an *Advertise* DLPDU, it includes in its list of two-hop neighbors those devices that are listed in the received *Advertise* DLPDU and are not identified as one of its one-hop neighbors. A device is maintained in the neighbor table until a timeout expires without receiving (directly or through other nodes) any update about this device. LCA requires devices to only try to receive *Advertise* DLPDUs from their one-hop or two-hop neighbors. As a result, LCA improves the utilization of the radio resources and energy consumption compared to LAN since it significantly reduces the time a device needs to be in reception mode to listen for *Advertise* DLPDUs. A device implementing LCA can utilize this free time to perform other functions, including transmitting data.

### 4.2.3 Listen Advertise Network for mobile devices

LAN and LCA seek reducing the time necessary to detect neighbor devices in WirelessHART. This is critical for mobile devices that constantly change their neighbor relations, and can therefore get disconnected from the network if they do not detect neighbor devices in time. On the other hand, static devices do not frequently change their neighbors, and therefore do not require short neighbor detection times. LAN and LCA do not differentiate between static and mobile devices, and treat them equally in terms of the neighbor discovery process. In this context, this chapter proposes an additional NDP protocol, referred to as LANm (Listen Advertise Network for mobile devices), that exploits the different needs and characteristics of mobile and static devices. A device is considered to be mobile if it has the ability to move, regardless of whether it is in constant movement or can be partially static; e.g. a device attached to a forklift is considered mobile, while a device attached to a tufting machine is considered static. This characteristic (static or mobile) is therefore inherent to each device and does not change over time.

LANm applies WH to all (static and mobile) devices that will then listen for *Keep-alive* DLPDUs sent on the shared *Discovery Link* in order to detect neighbor devices. In

addition, LANm applies the LAN scheme to mobile devices<sup>7</sup>. In this case, the *Network Manager* only schedules mobile devices to be in reception mode when all network devices (mobile and static) send their *Advertise* DLPDUs. To inform the *Network Manager* about whether a given device is mobile or static, one of the bits currently reserved for future use in the *specifier* field of the *Join Request* could be used [10].

By combining WH and LAN, LANm seeks to improve the utilization of the radio resources and energy consumption while guaranteeing the capacity to quickly detect neighbor devices. This is the case since WH consumes a very small number of radio resources, and LAN improves the capacity to detect neighbor devices. LANm is the first scheme that combines deterministic and probabilistic NDP approaches in WirelessHART.

### 4.3 Metrics

The performance of the NDP schemes is evaluated using different metrics. A key metric is the discovery probability. The discovery probability is defined as the probability that a device  $i$  discovers another device  $j$  or vice versa ( $P_{disc}$ ), considering that they are under each other's coverage range only during a time period  $t_{cov}$ . Another important metric is the average time required to detect a neighbor device ( $t_{det}$ ). This metric is estimated as the average time elapsed from the moment a device enters the coverage range of another device until the moment it is detected.

A mobile device does not require detecting all its neighbor devices to maintain the connection to the network. Such connection can be maintained if the mobile device is always connected to at least one neighbor device that is connected to the network. A relevant metric is then the probability that a mobile device remains connected to the network ( $P_{conn}$ ) while it moves around its coverage area.  $P_{conn}$  is here computed as the ratio between the number of evaluations during which the mobile device did not lose connectivity to the network and the number of conducted evaluations for a particular scenario.

---

<sup>7</sup> It is important noting that applying LAN to mobile devices instead of LCA minimizes the impact on static devices. If LCA was applied to mobile devices, static devices would need to modify their *Advertise* DLPDU in order to include their list of neighbors. With LCA, a mobile node could only detect a device  $i$  if it had previously detected a device  $j$  that had  $i$  in its list of neighbors. In any case, tests were also done applying LCA to mobile devices, and no significant differences (in performance and energy consumption) were observed compared to when mobile devices implement LAN.

Several metrics are utilized to analyze the efficiency of NDPs. One of these metrics is the average *Number of Bytes Consumed (NBC)* by the discovery process per *Management Superframe*. *NBC* takes into account the bytes needed for the correct operation of the NDP, and the bytes that are left unused as certain links that are not directly used by the NDP protocol are blocked and cannot be utilized for other purposes either. This is for example the case when all devices must be in reception mode in one link, and no device can actually transmit/receive data in a different channel. The efficiency of NDPs is also analyzed by means of the total number of links used for neighbor discovery per *Management Superframe*. Differently from *NBC*, this metric does not take into account whether the dedicated links are utilized or not.

Finally, an important aspect when dealing with battery-powered mobile devices is the energy consumption. The energy efficiency is here investigated by estimating the average energy consumed ( $E_d$ ) by the discovery process of each NDP per device and *Management Superframe*. This metric is estimated considering the energy consumed by the transmission or reception of the necessary DLPDUs, the energy consumed when devices are in idle or reception mode, and the energy consumed by the configuration of devices ( $E_c$ ) following the WirelessHART standard.

#### 4.4 Analytical performance modeling

This section presents analytical performance models for the different NDP schemes. In particular, it presents analytical expressions of the neighbor discovery probability, the average time needed to detect a neighbor, the efficiency and the energy consumption. These expressions are derived to help understand the influence of different parameters, and provide a tool to obtain first estimates of the performance characterizing each NDP scheme.

##### 4.4.1 System model

Table 4-1 lists the important symbols and parameters defined in this section to support the readability of the proposed analytical performance models. This study considers an industrial wireless network with  $H$  devices. All  $H$  devices have previously joined the network and there are not new devices trying to join the network. A device can be either a static device or a mobile device. As previously mentioned, a device is considered to be mobile if it has the ability to move, regardless of whether it is in constant movement or is partially static. Static devices support the connection of mobile devices to the network. The number of mobile devices in the network is  $M$ .

Table 4-1. Symbols and parameters.

$B$	Length of a <i>Keep-alive</i> DLPDU in bytes
$B_A$	Length of the Device ID in bytes
$B_D$	Number of bytes transmitted by the <i>Network Manager</i> to schedule an <i>Advertise Link</i>
$C$	Number of frequency channels
$DI$	Number of <i>Discovery Links</i> in a <i>Management Superframe</i>
$DL_{dl}$	Link within the <i>Management Superframe</i> for the <i>dl Discovery Link</i>
$DLN_i$	Number of <i>Management Superframes</i> within <i>Discovery_time</i> for device $i$
$E_c$	Energy consumed by the configuration of devices
$E_{idle}$	Average energy consumed per device in idle mode
$E_{list}$	Energy consumed by a device when transmitting the neighbor list
$E_{Rx-KA}$	Energy consumed by a device when receiving a <i>Keep-alive</i> DLPDU
$E_{Rx-Ad}$	Energy consumed by a device when receiving an <i>Advertise</i> DLPDU
$E_{Tx-KA}$	Energy consumed by a device when transmitting a <i>Keep-alive</i> DLPDU
$E_{Tx-Ad}$	Energy consumed by a device when transmitting an <i>Advertise</i> DLPDU
$H$	Number of deployed nodes
$H_{h1}$	Number of one-hop neighbors of device $h$
$H_{h2}$	Number of one-hop or two-hop neighbors of device $h$
$hop_h$	Number of hops between device $h$ and the <i>Network Manager</i>
$M$	Number of mobile devices
$N$	Noise power level
$N_s$	Number of slots within a superframe
$P_i$	Probability that a device $i$ transmits a <i>Keep-alive</i> DLPDU in one <i>Discovery Link</i>
$P_i^{dl}$	Probability that device $i$ transmits in the <i>dl Discovery Link</i> of a <i>Management Superframe</i>
$P_{i,j}^H$	Probability that a device $i$ detects device $j$ in one <i>Discovery Link</i> or <i>Advertise Link</i>
$p_{i,j}^{H,S}$	Probability that a device $i$ receives at least one <i>Advertise</i> DLPDU or one <i>Keep-alive</i> DLPDU in $S$ <i>Discovery</i> or <i>Advertise Links</i>
$P_{i,j}^S$	Probability that devices $i$ and $j$ are under each other's coverage range during $S$ <i>Advertise/Discovery Links</i>
$P_{i \leftrightarrow j}^S$	Probability that devices $i$ and $j$ discover each other at least once in $S$ <i>Management Superframes</i>
$P_{i-NRx}$	Probability that the received signal strength of a <i>Keep-alive</i> DLPDU is below the minimum signal needed to start the reception
$P_{I-Rx-Ad(j)}$	Probability that device $i$ receives an <i>Advertise</i> from $j$ with a signal strength above the minimum signal needed to start the reception
$P_{rec}(i,h)$	Received signal power level at device $i$ from the interfering device $h$ that simultaneously transmits a packet
$P_{rec}(i,j)$	Received signal power level at device $i$ from device $j$
$Q_{ij}$	Number of hops between $i$ and $j$
$R_i$	Probability that a device $i$ is in reception mode in one <i>Discovery Link</i>
$S$	Number of <i>Management Superframes</i> under evaluation
$SINK_{i,j}^H$	SINR experienced by device $i$ when receiving a packet from device $j$ under the presence of $H$ devices
$t$	Elapsed time under evaluation
$t_s$	Time slot duration
$t_{cov}$	Time in which the PDR between $i$ and $j$ is higher than $PDR_{min}$
$T_N$	Periodicity of the <i>Management Superframe</i>
$\rho$	Number of bytes that can be transmitted in a link

The *Network Manager* is in charge of the scheduling function for the neighbor discovery process on the *Management Superframe*. A *Management Superframe* has  $N_s$  slots and the duration of each slot is  $t_s$ ; the duration of a *Management Superframe* is then  $T_N = N_s \cdot t_s$ . In each slot,  $\rho$  bytes can be transmitted, and the number of frequency channels is defined as  $C$ .

The WirelessHART standard provides the *Network Manager* some flexibility for the scheduling of *Advertise Links* and *Discovery Links* since it does not define specific scheduling algorithms. Without loss of generality, this study considers that each device is allocated an *Advertise Link* per *Management Superframe* to transmit its *Advertise* DLPDU. This means that  $H$  *Advertise* DLPDUs are transmitted per *Management Superframe*. Also, this study considers that there is one *Discovery Link* in every *Management Superframe* which is shared by all devices. Therefore the *Discovery Link* has a periodicity of  $T_N$  seconds.

The mathematical notation used employs subscripts to refer to nodes or protocols. Superscripts are used to refer to the number of deployed nodes ( $H$ ) or the number of *Management Superframes* under evaluation ( $S$ ).

#### 4.4.2 Discovery probability

##### WirelessHART Neighbor Discovery

The WirelessHART neighbor discovery process is based on the transmission and reception of *Keep-alive* DLPDUs in *Discovery Links*. In the most general case where there are  $DL$  *Discovery Links* in a *Management Superframe*, the probability of a given device  $i$  to be in transmission or reception mode is different for each of the  $DL$  *Discovery Links*. The probability that device  $i$  transmits in the  $dl$  *Discovery Link* ( $1 \leq dl \leq DL$ ) of a *Management Superframe* ( $P_i^{dl}$ ) can be expressed as:

$$P_i^{dl} = \frac{\frac{DL_{dl} - DL_{dl-1}}{N_s}}{\frac{DLN_i - 1}{2} + \sum_{x=1}^{DL} \left( \frac{DL_x - DL_{x-1}}{N_s} \sum_{y=x}^{DL} \frac{DL_y - DL_{y-1}}{N_s} \right)} \quad (4-1)$$

where  $DL_{dl} - DL_{dl-1}$  is the number of links between the  $dl$  *Discovery Link* and the previous *Discovery Link*,  $DLN_i = \lceil \text{Discovery\_time} / T_N \rceil$  is the number of *Management Superframes* within *Discovery\_time* for device  $i$ , and  $N_s$  is the number of slots in a *Management Superframe*.

The *Network Manager* has certain flexibility to schedule the *Discovery Links*, and it is reasonable to uniformly distribute them over the *Management Superframe* to improve the use of available radio resources. For example, if two *Discovery Links* in a *Management Superframe* were scheduled in consecutive slots, the second one will almost never be used to transmit a *Keep-alive* DLPDU. This study therefore assumes that *Discovery Links* are uniformly distributed in the *Management Superframe*, and without loss of generality, this study assumes that there is only one<sup>8</sup> *Discovery Link* in every *Management Superframe*, i.e.  $DL=1$ . In this case,  $DL_{dl} - DL_{dl-1} = N_s$  and the expression of the probability that device  $i$  transmits in the *Discovery Link* is simplified as follows:

$$P_i^{dl} = P_i = \frac{1}{\frac{DLN_i - 1}{2} + 1} = \frac{2}{DLN_i + 1} \quad (4-2)$$

The probability that a device  $i$  is in reception mode in one *Discovery Link* ( $R_i$ ) can be expressed as:

$$R_i = 1 - P_i = \frac{DLN_i - 1}{DLN_i + 1} \quad (4-3)$$

Device  $i$  will discover device  $j$  if device  $j$  transmits a *Keep-alive* DLPDU, device  $i$  is in reception mode, and the Signal to Interference and Noise Ratio (SINR) is sufficient to correctly receive the *Keep-alive* DLPDU. Let's consider that  $H$  devices can interfere the transmission from device  $j$ . In this case, the probability that device  $i$  discovers device  $j$  in one *Discovery Link* can be expressed for WH as:

$$P_{i,j}^H |_{WH} = P_j \cdot R_i \cdot PDR(SINR_{i,j}^H) \quad (4-4)$$

where  $SINR_{i,j}^H$  is the SINR experienced by device  $i$  when receiving a *Keep-alive* DLPDU from device  $j$  under the presence of  $H$  neighbors, and  $PDR(SINR_{i,j}^H)$  is the Packet Delivery Ratio (PDR) at device  $i$  when experiencing  $SINR_{i,j}^H$ . If it is assumed that a single bit error out of  $B$  bytes is enough to corrupt a *Keep-alive* DLPDU, it is possible to express the PDR as a function of the Bit Error Rate (BER):

$$PDR(SINR_{i,j}^H) = \left(1 - BER(SINR_{i,j}^H)\right)^{8 \cdot B} \quad (4-5)$$

where  $BER(SINR_{i,j}^H)$  is the bit error rate for  $SINR_{i,j}^H$ .

<sup>8</sup> The mathematical model and the results obtained for  $DL=1$  are equivalent to the case where  $DL>1$  and  $T'_N=T_N/DL$  if the *Discovery Links* are uniformly distributed.

If it is assumed that the effect of the interfering signal on the desired signal is similar to Additive White Gaussian Noise (AWGN), the BER and  $SINR_{i,j}^H$  can be expressed as [13]:

$$BER(SINR_{i,j}^H) = \frac{8}{15} \times \frac{1}{16} \times \sum_{k=2}^{16} (-1)^k \binom{16}{k} e^{\left(20 \times SINR_{i,j}^H \times \left(\frac{1}{k} - 1\right)\right)} \quad (4-6)$$

$$SINR_{i,j}^H = 10 \log \frac{P_{rec}(i,j)}{\sum_{h \neq j} P_{rec}(i,h) + N} \quad (4-7)$$

where  $P_{rec}(i,j)$  represents the received signal power level at device  $i$  from device  $j$ ,  $N$  the noise power level, and  $P_{rec}(i,h)$  the received signal power level at device  $i$  from the interfering device  $h$  that simultaneously transmits its *Keep-alive* DLPDUs in the *Discovery Link* under evaluation. The probability that a device  $i$  receives at least one *Keep-alive* DLPDU from device  $j$  in  $S$  *Discovery Links* can be expressed as:

$$P_{i,j}^{H,S} |_{WH} = 1 - \prod_{s=1}^S (1 - P_{i,j}^H |_{WH}) = 1 - \prod_{s=1}^S (1 - P_j \cdot R_i \cdot PDR(SINR_{i,j}^H)) \quad (4-8)$$

The probability that devices  $i$  or  $j$  discover each other at least once in  $S$  *Discovery Links* can be expressed as follows:

$$P_{i \leftrightarrow j}^S |_{WH} = 1 - \prod_{s=1}^S (1 - (P_{i,j}^H |_{WH} + P_{j,i}^H |_{WH})) \quad (4-9)$$

where  $P_{i,j}^H |_{WH}$  and  $P_{j,i}^H |_{WH}$  are mutually exclusive. Finally, the discovery probability can be expressed for WH as:

$$P_{disc} |_{WH} = P_{i,j}^S \cdot P_{i \leftrightarrow j}^S |_{WH} + P_{i,j}^{S+1} \cdot P_{i \leftrightarrow j}^{S+1} |_{WH} \quad (4-10)$$

where  $P_{i,j}^S$  and  $P_{i,j}^{S+1}$  represent the probability that devices  $i$  and  $j$  are under each other's coverage during  $S$  and  $S+1$  *Discovery Links*, respectively. To avoid low quality links, it is defined  $PDR_{min}$  as the minimum PDR needed to consider that two devices are within their coverage range and therefore are neighbors.  $t_{cov}$  represents the time during which the PDR between devices  $i$  and  $j$  is higher than  $PDR_{min}$ . In this context,  $S$ ,  $P_{i,j}^S$  and  $P_{i,j}^{S+1}$  can be expressed as eq. (4-11), eq. (4-12) and eq. (4-13), respectively.

$$S = \left\lceil \frac{t_{cov}}{T_N} \right\rceil \quad (4-11)$$

$$P_{i,j}^S = \left\lceil \frac{t_{cov}}{T_N} \right\rceil - \frac{t_{cov}}{T_N} \quad (4-12)$$

$$P_{i,j}^{S+1} = \frac{t_{cov}}{T_N} - \left\lceil \frac{t_{cov}}{T_N} \right\rceil \quad (4-13)$$



### LAN Neighbor Discovery

With LAN, the probability that a device  $i$  detects the presence of device  $j$  is equivalent to the probability that device  $i$  receives an *Advertise* DLPDU transmitted by  $j$ . Since all devices are scheduled to be in reception mode when device  $j$  transmits its *Advertise* DLPDU, this probability only depends on the experienced SINR:

$$P_{i,j}^H|_{LAN} = PDR(SINR_{i,j}^H) \quad (4-14)$$

where  $SINR_{i,j}^H$  only depends on  $P_{rec}(i, j)$  and  $N$  (noise power level) since there are no interfering devices on dedicated links, i.e.  $P_{rec}(i, h)$  is null in eq. (4-7). The probability in LAN that a device  $i$  receives at least one *Advertise* DLPDU in  $S$  *Advertise Links* from  $j$  is:

$$P_{i,j}^{H,S}|_{LAN} = 1 - \prod_{s=1}^S (1 - P_{i,j}^H|_{LAN}) = 1 - \prod_{s=1}^S (1 - PDR(SINR_{i,j}^H)) \quad (4-15)$$

The probability that devices  $i$  or  $j$  discover each other at least once in  $S$  *Management Superframes* can be expressed as:

$$P_{i \leftrightarrow j}^S|_{LAN} = 1 - \prod_{s=1}^S (1 - (1 - (1 - P_{i,j}^H|_{LAN}) \cdot (1 - P_{j,i}^H|_{LAN}))) \quad (4-16)$$

where  $1 - (1 - P_{i,j}^H|_{LAN}) \cdot (1 - P_{j,i}^H|_{LAN})$  corresponds to the probability that devices  $i$  or  $j$  discover each other in one *Management Superframe* when one *Advertise Link* per device and *Management Superframe* is considered.  $P_{i,j}^{H,S}$  and  $P_{j,i}^{H,S}$  are not mutually exclusive in the case of LAN. Finally, the discovery probability can be expressed for LAN as:

$$P_{disc}|_{LAN} = 1 - (1 - (P_{i,j}^S \cdot P_{i,j}^{H,S}|_{LAN} + P_{i,j}^{S+1} \cdot P_{i,j}^{H,S+1}|_{LAN})) \cdot (1 - (P_{j,i}^S \cdot P_{j,i}^{H,S}|_{LAN} + P_{j,i}^{S+1} \cdot P_{j,i}^{H,S+1}|_{LAN})) \quad (4-17)$$

where  $P_{i,j}^S$  and  $P_{i,j}^{S+1}$  represent the probability that devices  $i$  and  $j$  are under each other's coverage range during  $S$  and  $S+1$  *Advertise Links* respectively.

### LCA Neighbor Discovery

With LCA, the probability that a given device  $i$  detects the presence of device  $j$  depends on the number of hops between  $i$  and  $j$  ( $Q_{ij}$ ). This is the case because both devices will only be in reception mode during their respective *Advertise Link* if they are 1 or 2 hops away.  $P_{i,j}^H$  can then be expressed for LCA as:

$$P_{i,j}^H|_{LCA} = \begin{cases} PDR(SINR_{i,j}^H) & \text{if } Q_{i,j} \leq 2 \\ 0 & \text{if } Q_{i,j} > 2 \end{cases} \quad (4-18)$$

The probability that device  $i$  receives at least one *Advertise* DLPDU in  $S$  *Advertise Links* from  $j$  ( $P_{i,j}^{H,S}$ ) with LCA can be obtained by combining equations (4-15) and (4-18). The probability that devices  $i$  or  $j$  detect each other at least once in  $S$  *Management Superframes* ( $P_{i \leftrightarrow j}^S$ ) for LCA can be obtained with equations (4-16) and (4-18). The discovery probability can be expressed for LCA as:

$$P_{disc} |_{LCA} = \begin{cases} P_{disc} |_{LAN} & \text{if } Q_{i,j} \leq 2 \\ 0 & \text{if } Q_{i,j} > 2 \end{cases} \quad (4-19)$$

#### LANm Neighbor Discovery

LANm differentiates between static or mobile devices. As a result, the probability that a device  $i$  is able to detect a device  $j$  also depends on whether devices are mobile or static. This probability in a *Management Superframe* is:

$$P_{i,j}^H |_{LANm} = \begin{cases} P_{i,j}^H |_{WH} & \text{if } i \text{ is static} \\ 1 - (1 - P_{i,j}^H |_{WH}) \cdot (1 - P_{i,j}^H |_{LAN}) & \text{if } i \text{ is mobile} \end{cases} \quad (4-20)$$

The probability that a device  $i$  receives at least one *Advertise* DLPDU or one *Keep-alive* DLPDU in  $S$  *Management Superframes* can be obtained as:

$$P_{i,j}^{H,S} |_{LANm} = 1 - \prod_{s=1}^S (1 - P_{i,j}^H |_{LANm}) \quad (4-21)$$

Then,  $P_{i \leftrightarrow j}^S$  can also be obtained for LANm as:

$$P_{i \leftrightarrow j}^S |_{LANm} = 1 - \prod_{s=1}^S (1 - (1 - (1 - P_{i,j}^H |_{LANm}) \cdot (1 - P_{j,i}^H |_{LANm}))) \quad (4-22)$$

Finally, the discovery probability for LANm also needs to take into account whether the devices are mobile or static, and can be expressed as:

$$P_{disc} |_{LANm} = \begin{cases} P_{disc} |_{WH} & \text{if } i \text{ and } j \text{ are static} \\ 1 - (1 - P_{disc} |_{WH}) \cdot (1 - P_{disc} |_{LAN}) & \text{if } i \text{ and } j \text{ are mobile} \\ 1 - (1 - P_{disc} |_{WH}) \cdot (1 - (L_S \cdot P_{i,j}^{H,S} |_{LAN} + L_{S+1} \cdot P_{i,j}^{H,S+1} |_{LAN})) & \text{if other} \end{cases} \quad (4-23)$$

#### 4.4.3 Average time needed to detect a neighbor device

It is considered that two devices enter into each other's communications range when the PDR is higher than  $PDR_{min}$ . In this case,  $t_{det}$  can be estimated as:

$$t_{\text{det}}|_{\text{PROT}} = \left( \frac{1}{2} + \sum_{S=1}^{\infty} \left( (P_{i,j}^{H,S}|_{\text{PROT}} - P_{i,j}^{H,S-1}|_{\text{PROT}}) \cdot (S-1) \right) \right) \cdot T_N \quad (4-24)$$

where PROT is the protocol considered (WH, LAN, LCA or LANm for static devices). The  $\frac{1}{2}T_N$  factor corresponds to the average time elapsed from the moment two devices enter into each other's range until the first *Discovery Link* (WH and LANm static devices) or *Advertise Link* (LAN and LCA). The summation in eq. (4-24) corresponds to the probability of correctly receiving the first *Keep-alive* or *Advertise* DLPDU in the  $S^{\text{th}}$  *Discovery Link* or *Advertise Link* from device  $j$  (i.e.  $P_{i,j}^{H,S} - P_{i,j}^{H,S-1}$ ) multiplied by the average time elapsed until this happens (i.e.  $T_N \cdot (S-1)$ ).

A mobile device implementing LANm can detect other devices through an *Advertise Link* or a *Discovery Link*.  $t_{\text{det}}$  is estimated for mobile devices as:

$$t_{\text{det}}|_{\text{LANm}} = \frac{1}{2} \left( \frac{T_N}{2} + \sum_{S=1}^{\infty} \left( (1 - P_{i,j}^{H,S}|_{\text{LANm}}) \cdot P_{i,j}^H|_{\text{WH}} \cdot (S-1) \cdot T_N \right) + \sum_{S=1}^{\infty} \left( (1 - P_{i,j}^{H,S}|_{\text{LANm}}) \cdot (1 - P_{i,j}^H|_{\text{WH}}) \cdot P_{i,j}^H|_{\text{LAN}} \cdot \left( S - \frac{1}{2} \right) \cdot T_N \right) \right) \quad (4-25)$$

$$+ \frac{1}{2} \left( \frac{T_N}{2} + \sum_{S=1}^{\infty} \left( (1 - P_{i,j}^{H,S}|_{\text{LANm}}) \cdot P_{i,j}^H|_{\text{LAN}} \cdot (S-1) \cdot T_N \right) + \sum_{S=1}^{\infty} \left( (1 - P_{i,j}^{H,S}|_{\text{LANm}}) \cdot (1 - P_{i,j}^H|_{\text{LAN}}) \cdot P_{i,j}^H|_{\text{WH}} \cdot \left( S - \frac{1}{2} \right) \cdot T_N \right) \right)$$

The first line (i.e. the first term of the sum in eq. (4-25) that is multiplied by the factor  $\frac{1}{2}$ ) corresponds to the case in which the mobile device tries first to detect a device in a *Discovery Link*. The time to detect a device is then equal to the sum of the probability of correctly receiving the  $S^{\text{th}}$  *Keep-alive* DLPDU, multiplied by the average time elapsed until then  $((S-1) \cdot T_N)$ , and of the probability of not receiving the  $S^{\text{th}}$  *Keep-alive* DLPDU multiplied by the probability of correctly receiving the  $S^{\text{th}}$  *Advertise* DLPDU and by the average time elapsed until then  $((S-\frac{1}{2}) \cdot T_N)$ . The second line (i.e. the second term of the sum in eq. (4-25) that is multiplied by the factor  $\frac{1}{2}$ ) corresponds to the case in which the mobile device tries first to detect a device in one *Advertise Link*. The expressions are obtained similarly to the case in which the mobile device tries first to detect neighbor devices in a *Discovery Link*, but replacing *Keep-alive* DLPDUs by *Advertise* DLPDUs.

#### 4.4.4 Efficiency

In WH, each *Discovery Link* has an associated *NBC* of  $\rho \cdot C$  bytes, where  $C$  is the number of frequency channels and  $\rho$  represents the amount of information that can be transmitted in a link. In this study, it is considered  $\rho$  equal to 133 bytes, since 133 is the maximum number of bytes that can be transmitted in a link. The *NBC* associated to WH (eq. (4-26)) includes  $\rho$  bytes resulting from the transmission of a *Keep-alive* DLPDU in a *Discovery Link*, and  $\rho \cdot (C-1)$  bytes since all other devices need to be in reception mode during the *Discovery Link* and therefore cannot utilize the remaining  $C-1$  channels.

$$NBC|_{WH} = \rho + \rho \cdot (C - 1) = \rho \cdot C \quad (4-26)$$

LAN utilizes  $H$  *Advertise Links* when the network has  $H$  devices. Each *Advertise Link* requires an *NBC* of  $\rho \cdot (C-1)$  bytes because all devices need to be in reception mode during this link, and therefore the remaining  $C-1$  channels cannot be used. The *NBC* of LAN does not take into account the transmission of an *Advertise* DLPDU because it is needed to provide network information to devices trying to join the network, and therefore it has to be transmitted independently of the NDP. On the other hand, it is needed to take into account the *NBC* consumed by the *Network Manager* to schedule each device to be in reception mode in  $H-1$  *Advertise Links*. In this context, the average *NBC* that LAN generates per *Management Superframe* is then:

$$NBC|_{LAN} = H \cdot \rho \cdot (C - 1) + \frac{T_N}{t} \cdot \sum_{h=1}^H (H - 1) \cdot B_D \cdot hop_h \quad (4-27)$$

where  $t$  is the elapsed time,  $T_N$  is the duration of a *Management Superframe*,  $B_D$  represents the number of bytes transmitted by the *Network Manager* to send the schedule of an *Advertise Link* to one device, and  $hop_h$  is the number of hops between device  $h$  and the *Network Manager*.

With LCA, only two-hop neighbor devices need to be in reception mode for each device's *Advertise Link*. The rest of devices can utilize the other channels that are not used to transmit the given *Advertise Link*. Similarly to LAN, the *Network Manager* also has to schedule all the *Advertise Links* with LCA. Additionally, each device needs to include in its *Advertise* DLPDUs a list with the identity of its one-hop neighbors. The *NBC* associated to LCA can be computed as:

$$NBC|_{LCA} = \sum_{h=1}^H H_{h1} \cdot B_A + \frac{T_N}{t} \cdot \sum_{h=1}^H (H - 1) \cdot B_D \cdot hop_h + \rho \cdot \sum_{\forall h \in H^*} ((C - 1) - (H - H_{h2} - 1)) \quad (4-28)$$

where  $H_{h1}$  is the number of one-hop neighbors of device  $h$ ,  $B_A$  is the amount of bytes sent in each *Advertise* DLPDU per device, and  $H_{h2}$  is the number of one-hop or two-hop neighbors of device  $h$ . The first term of the equation represents the additional information sent by all devices in their respective *Advertise* DLPDU to include the identity of their one-hop neighbors. This information is transmitted by all devices in every *Management Superframe*. The second term in eq. (4-28) refers to the *NBC* associated to the scheduling process conducted by the *Network Manager*, which is exactly the same as in LAN. The third term in eq. (4-28) quantifies the number of bytes consumed considering that only one-hop and two-hop neighbor devices need to be in

reception mode for each device's *Advertise Link*. Devices at more than two hops from a device sending an *Advertise* DLPDU could be in transmission or reception mode in other channels for functions not related to neighbor discovery. The number of channels that cannot be used when a given device  $h$  transmits its *Advertise* DLPDU is  $(C-1)-(H-H_{h2}-1)$ , where  $H-H_{h2}-1$  is the number of devices at more than two hops from device  $h$  and  $C-1$  is the number of available channels for other functions. The *NBC* associated to the transmission of the *Advertise* DLPDU by device  $h$  is then  $\rho \cdot (C-1)-(H-H_{h2}-1)$  if  $C-1$  is higher than  $H-H_{h2}-1$ . If  $C-1$  is lower or equal than  $H-H_{h2}-1$ , then all available channels can be utilized for functions not related to neighbor discovery, and the *NBC* associated to this process is null. To include this effect in equation (4-28), only nodes  $h \in H^*$  are considered in the summation, where  $H^*$  is the set of devices for which  $(C-1) > (H-H_{h2}-1)$ .

All devices implementing LANm utilize the transmission of *Keep-alive* DLPDUs in the *Discovery Link* for the discovery process. This has an associated *NBC* of  $\rho \cdot C$  bytes. Additionally, each of the  $M$  mobile devices is scheduled by the *Network Manager* to be in reception mode in  $H-1$  *Advertise Links* so that they can receive the *Advertise* DLPDU from the other network devices. The average *NBC* associated to LANm per *Management Superframe* can then be estimated as:

$$NBC|_{LANm} = \rho \cdot C + \frac{T_N}{t} \cdot \sum_{m=1}^M (H-1) \cdot B_D \cdot hop_m \quad (4-29)$$

#### 4.4.5 Energy consumption

Eq. (4-30) represents the average energy consumed per device and per *Management Superframe* by WH. It is computed considering the transmission and reception of *Keep-alive* DLPDUs in each *Discovery Link*.  $P_i$  (eq. (4-2)) and  $R_i$  (eq.(4-3)) represent the probability of transmitting and receiving a *Keep-alive* DLPDU in each *Discovery Link*, respectively.  $E_{Tx-KA}$  and  $E_{Rx-KA}$  represent the energy consumed by a device when transmitting and receiving a *Keep-alive* DLPDUs, respectively.  $P_{i-NRx}$  represents the probability that the received signal strength of a *Keep-alive* DLPDU is below the minimum signal needed to start the reception process. In this case, the device goes to idle mode and consumes  $E_{idle}$ <sup>9</sup>.

$$E_d|_{WH} = \frac{T_N}{H \cdot t} \cdot E_C + \frac{1}{H} \cdot \sum_{i=1}^H (P_i \cdot E_{Tx-KA} + (R_i - P_{i-NRx}) \cdot E_{Rx-KA} + P_{i-NRx} \cdot E_{idle}) \quad (4-30)$$

<sup>9</sup> The energy consumption is estimated based on the WirelessHART standard, which establishes that when the received signal strength of a DLPDU is below the minimum signal needed to start the reception process, the receiver turns off the radio after 2ms (idle mode).

The average energy consumed by LAN (eq. (4-31)) does not consider the energy consumed by devices transmitting *Advertise* DLPDUs ( $E_{Tx-Ad}$ ) since they have to be transmitted anyway to help new devices join the network. The energy is computed considering the reception of *Advertise* DLPDUs ( $E_{Rx-Ad}$ ) and the energy consumed when a device goes into idle mode.  $P_{i-Rx-Ad(j)}$  represents the probability that device  $i$  receives an *Advertise* DLPDU transmitted by device  $j$  with a signal strength above the minimum threshold level needed to start the reception.

$$E_d|_{LAN} = \frac{T_N}{H \cdot t} \cdot E_C + \frac{1}{H} \cdot \sum_{i=1}^H \sum_{j \neq i}^H (P_{i-Rx-Ad(j)} \cdot E_{Rx-Ad} + (1 - P_{i-Rx-Ad(j)}) \cdot E_{idle}) \quad (4-31)$$

The average energy consumed by LCA is expressed in eq. (4-32). It is computed considering the energy consumed by the transmission of the list of one-hop neighbors attached to each *Advertise* DLPDU ( $E_{list}$ ), and the energy that a device  $i$  consumes when listening or receiving the *Advertise* DLPDUs of its two-hop neighbors. The number of one-hop and two-hop neighbors is represented by  $H_{i2}$ .

$$E_d|_{LCA} = \frac{T_N}{H \cdot t} \cdot E_C + \frac{1}{H} \cdot \sum_{i=1}^H \left( E_{list} + \sum_{j \neq i}^{H_{i2}} (P_{i-Rx-Ad(j)} \cdot E_{Rx-Ad} + (1 - P_{i-Rx-Ad(j)}) \cdot E_{idle}) \right) \quad (4-32)$$

The average energy consumed by LANm (eq. (4-33)) is equal to the energy consumed by WH (all devices use *Keep-alive* DLPDUs for the discovery process) plus the energy consumed by  $M$  mobile devices when listening *Advertise Links*.

$$E_d|_{LANm} = E_d|_{WH} + \frac{T_N}{H \cdot t} \cdot E_C + \frac{1}{H} \cdot \sum_{i=1}^M \sum_{j \neq i}^H (P_{i-Rx-Ad(j)} \cdot E_{Rx-Ad} + (1 - P_{i-Rx-Ad(j)}) \cdot E_{idle}) \quad (4-33)$$

## 4.5 Performance evaluation

### 4.5.1 Simulation platform

The performance of the different neighbor discovery protocols is evaluated using a simulation platform implemented in Matlab. The platform implements in detail all the functions that intervene in the neighbor discovery process, including the necessary functions at the *Network Manager*, a detailed radio propagation model, a mobility model, and the main modules of the physical and MAC layer of the WirelessHART protocol stack. All the modules have been implemented following the WirelessHART standard and state-of-the-art simulation practices (e.g. for modeling the propagation

and the interference) and have been validated in detail. Figure 4-1 shows the main components of the implemented simulation platform. A description of the main modules is presented below. For the interested reader, Annex A presents more details about the implemented platform and the results that validate its implementation.

To account for realistic propagation conditions, the platform implements the radio propagation model proposed in [26] for industrial environments. The model considers a one-slope log-distance path-loss model, and takes into account the fading effects at 2.4GHz using a log-normal random distribution. Some of the main parameters of the model are:  $d_0=15\text{m}$  (reference distance),  $PL(d_0)=71.84\text{dBm}$  (pathloss at  $d_0$  distance),  $n=2.16$  (pathloss exponent),  $\sigma=8.13\text{dBm}$  (shadowing standard deviation),  $G_t=G_r=0\text{dB}$  (transmitter and receiver antenna gains), and  $N=-93\text{dBm}$  (average noise power).

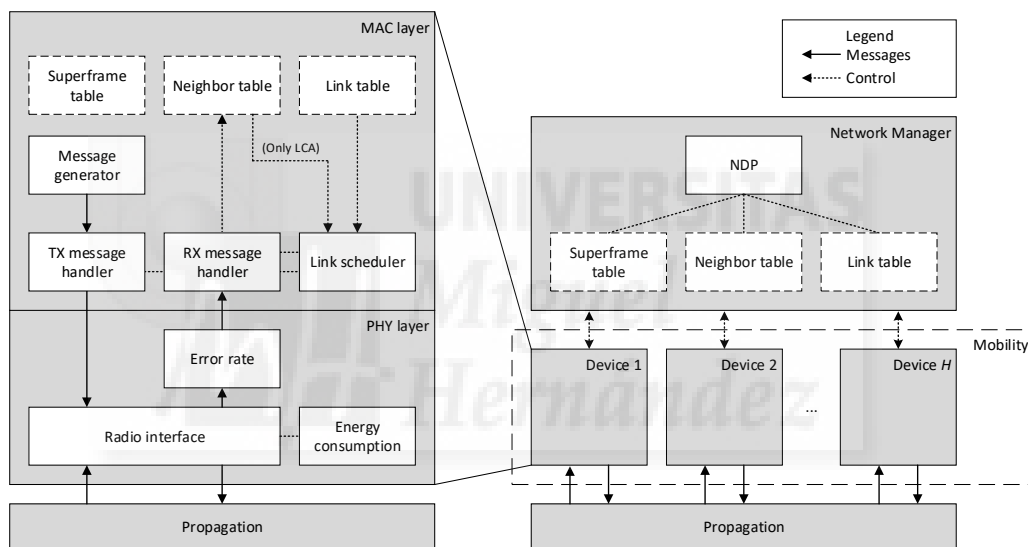


Figure 4-1. Block diagram of the simulation platform implemented.

At the physical layer, the simulation platform operates at the packet level and probabilistically determines if a packet is correctly received or not based on its SINR and an error rate model. This model emulates the performance of the physical layer of IEEE 802.15.4-2006 [13], which is the physical layer adopted in WirelessHART. To determine whether a packet is correctly received or not, a receiver's radio interface computes the SINR. In dedicated time slots, only one packet can be transmitted in the network, and it does not suffer any interference. In this case, the radio interface computes the SINR of the received packet using the received power level (estimated with the propagation model) and the average noise power level. In shared time slots, multiple packets can simultaneously arrive to the receiver and produce interference. In this case, the radio interface identifies the packet with highest received power level as the candidate packet

to be received, and the rest of packets are considered to represent interference and are used to calculate the SINR. The simulation platform implements the error rate model proposed in the IEEE 802.15.4-2006 standard for AWGN channels at 2.4GHz [13]. In particular, the model utilized is the one obtained for the OQPSK modulation that is used in WirelessHART [10].

The physical layer of the implemented simulation platform is also in charge of computing the energy consumed for the transmission and reception of packets. To do so, the platform models the time slot structure specified in the WirelessHART standard. The simulation platform models the power consumption using the reference values specified for the XDM2510H transceiver when it is powered with 3.6V [41]. This results in a power consumption of 18mA when the transceiver is in transmission mode and 6mA when the transceiver is in reception mode. The transmission power of the XDM2510H transceiver is 8dBm, and it has a reception sensibility of -90dBm.

The implementation of the MAC layer is also in line with the WirelessHART standard, and includes all the modules that influence the neighbor discovery process. The MAC layer implemented in the simulation platform includes the following three tables that control the communications of each device and collect communication statistics as specified in the WirelessHART standard:

- *Superframe Table*: it stores the attributes of a superframe, for example, the number of slots and the unique identifier.
- *Link Table*: it stores the attributes of all links including the type of link (normal, broadcast, join or discovery), the slot number in the superframe assigned to the link, the link use (transmission, reception or shared), the channel offset, and the neighbor ID (for dedicated links) among others.
- *Neighbor Table*: it stores the ID of all devices with which the device may be able to directly communicate with (1-hop neighbors). In LCA, this table has been extended to also include 2-hop neighbors.

The implementation of the *Link Scheduler* also follows the WirelessHART standard. Each device has a *Link Scheduler* that consults the tables of the device in order to identify the next slot that should be used for listening or sending a message. As it can be observed in Figure 4-1, the *Link Scheduler* is connected to the Tx and Rx Message Handler modules that are in charge of transmitting and receiving messages to/from the physical layer. For a given device, only one of them (Tx or Rx) can be active at the same time. The *Tx Message Handler* passes to the physical layer the messages generated at



the MAC by the *Message Generator* together with the information about the channel frequency to be used. The *Rx Message Handler* informs the physical layer of the channel frequency utilized, receives the messages that are successfully decoded by the physical layer, and updates the neighbor table based on the received messages. Differences can be found at the *Rx Message Handler* depending on the neighbor discovery protocol:

- WH only updates the *Neighbor Table* upon the reception of *Keep-alive* DLPDUs. In fact, devices that belong to the network are not scheduled by the *Network Manager* to listen to *Advertise* DLPDUs.
- LAN and LCA update the *Neighbor Table* upon the reception of *Advertise* DLPDUs. In fact, devices do not need to be configured to listen to *Keep-alive* DLPDUs.
- LANm updates the *Neighbor Table* upon the reception of *Advertise* and *Keep-alive* DLPDUs. Mobile devices are scheduled to transmit and receive *Advertise* DLPDUs, but static devices run the WirelessHART neighbor discovery protocol (i.e. they exploit *Keep-alive* DLPDUs).

The operation of the *Link Scheduler* mainly depends on the information in the tables that are configured by the *Network Manager*. As a result, the operation of the implemented *Link Scheduler* depends on the neighbor discovery protocol:

- WH: the *Link Scheduler* is in charge of managing the timer used to randomly transmit or receive a *Keep-alive* DLPDU in *Discovery Links*. To this aim, the *Link Scheduler* gets from the *Link Table* information about existing *Discovery Links*.
- LAN: the *Link Scheduler* gets from the *Link Table* the information about the links where *Advertise* DLPDUs need to be transmitted and received.
- LANm: the *Link Scheduler* of mobile devices also follows the information in the *Link Table* for the transmission and reception of *Advertise* DLPDUs. The *Link Scheduler* of static devices operates following WH.
- LCA: the *Link Scheduler* gets from the *Link Table* the information about the *Advertise* DLPDUs transmitted by all devices in the network. However, it only listens to those devices that are at one or two hops. To this aim, LCA needs to have access to the information on the *Neighbor Table* (Figure 4-1). The ID of the one-hop neighbors is attached to the corresponding *Advertise* DLPDU by the *Tx Message Handler*.

The WirelessHART *Network Manager* is in charge of allocating all links in the *Management Superframe*. To this aim, the *Network Manager* configures the *Link Table* of all devices. In the implemented simulation platform, the *Network Manager* allocates the links for the neighbor discovery process following the protocol under evaluation:

- WH: the *Network Manager* allocates the *Discovery Links* for the transmission of *Keep-alive* DLPDUs. *Discovery Links* are shared by all devices and therefore collisions can take place. Once these links have been allocated, the *Link Scheduler* of each device randomly selects to transmit a *Keep-alive* DLPDU or stay in reception mode in each *Discovery Link*.
- LAN: the *Network Manager* randomly allocates the *Advertise Links* of all devices, and avoids that two devices transmit their *Advertise* DLPDUs in the same slot. *Advertise Links* are dedicated links. As a result, each device has its own *Advertise Link* to transmit its *Advertise* DLPDU. The *Network Manager* configures the *Link Table* of all devices so that each one of them can listen to the *Advertise* DLPDUs sent by the other devices.
- LCA: the *Network Manager* executes the same allocation as when implementing LAN. However, the final decision to listen or not a given *Advertise Link* is taken locally by each device based on its *Neighbor Table*. A device will be in reception mode only for the *Advertise* DLPDUs of its one-hop and two-hop neighbors.
- LANm: the *Network Manager* allocates the *Discovery Links* for the transmission of *Keep-alive* DLPDUs following the WH protocol. In addition, it allocates the transmission of *Advertise Links* in dedicated links for all devices. Only mobile devices are configured to be in reception mode when all devices (mobile and static) send their *Advertise* DLPDUs.

Given the objectives of this study, the simulation platform does not implement the mechanisms needed by the *Network Manager* to send to each device its *Link Table*. It is assumed that these tables are configured and sent to each device when they join the network. They do not need to be updated, and as a result they do not influence this study that is focused on the performance and efficiency of neighbor discovery protocols.

By default, the WH and LANm NDPs have been evaluated considering one *Discovery Link* in each *Management Superframe* and  $DLN_i=10$ . This value was selected based on preliminary simulations that showed that it generally maximizes  $P_{i,j}^H$  for topologies with more than 16 devices (see Figure 4-2). For LCA,  $B_A$  has been set equal to 2 bytes (the ID of each device), and  $B_D$  has been set equal to 5 bytes (2 bytes of the device ID, 1 byte for

the WirelessHART channel list offset, and 2 bytes for the slot offset in the *Management Superframe*). A sufficiently high number of simulations have been conducted for each NDP and scenario under evaluation in order to ensure the statistical accuracy of the results, and in particular a relative error below 1% for all results reported in this chapter.

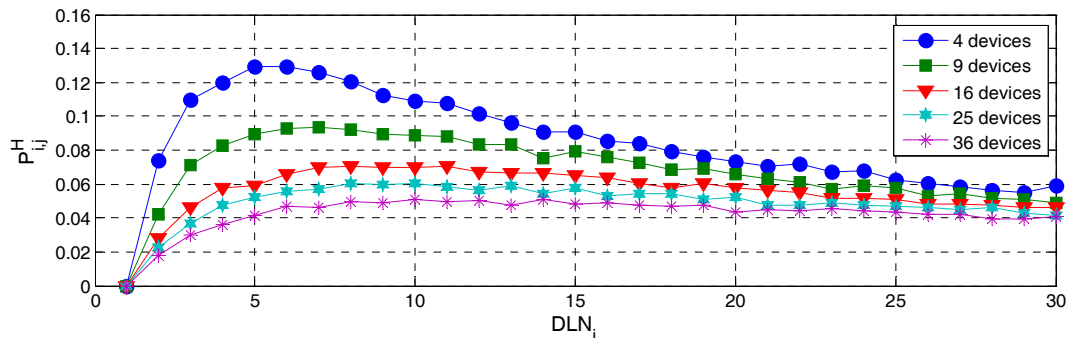


Figure 4-2. Probability of device  $i$  correctly receiving a *Keep-alive* DLPDU from  $j$  as a function of  $DLN_i$ , in the presence of 4, 9, 16, 25 and 36 static devices when considering equidistant static devices in a square area.

#### 4.5.2 Evaluation scenarios

This work considers an industrial wireless network scenario with a grid topology of static networked sensors/actuators. The grid of static devices supports the connection of mobile devices to the network [42]. Three grid topologies with different number of static devices (16, 25 and 36) have been analyzed (see Figure 4-3). For each topology, it is analyzed two different densities of static devices by varying the  $d$  parameter in Figure 4-3 ( $d=30\text{m}$  and  $d=60\text{m}$ ). The *Network Manager* (depicted in black in Figure 4-3) is located in the position that minimizes the average number of hops to all static devices.

Mobile devices have been deployed following two use cases. The first one considers that up to 5 mobile devices move following a random waypoint trajectory around the grid of static devices (see Figure 4-4a). To this aim, each mobile device selects a random destination point and a random speed between 0.1 and 3m/s. When the mobile device reaches the selected destination point, it repeats the process and starts moving towards a new random destination point without any pause. The second use case considers a single mobile device that moves along a corridor in the grid of static devices (see Figure 4-4b). The mobile device could represent a person, a vehicle or a robot that needs to periodically transmit data packets towards certain destination device. This use case has been considered to evaluate the probability that a mobile device remains connected to the network ( $P_{conn}$ ). In this use case, the mobile device moves from *Start* to *End* following the red arrow shown in Figure 4-4b at constant speed. The speed ( $v$ ) of the mobile device is evaluated between 0.1m/s and 3m/s.

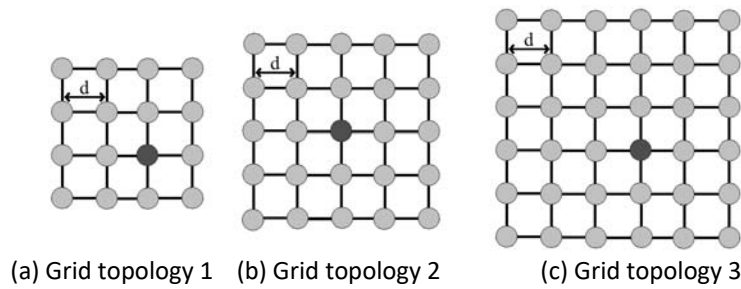


Figure 4-3. Evaluation topologies.

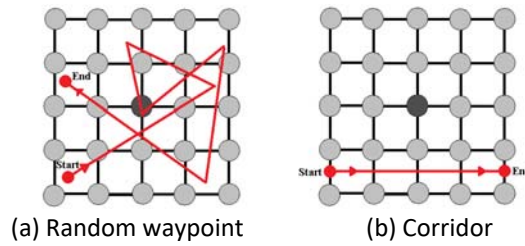


Figure 4-4. Mobility use cases over the grid topology 2.

### 4.5.3 Validation of analytical models

The performance of the proposed NDPs has been evaluated through extensive simulations following the scenarios and settings described in the previous section. This has been the case to account for realistic mobility, deployment and operating conditions that are difficult to integrate into the analytical models. The analytical performance models developed in Section 4.4 represent though valuable tools to obtain first insights into the performance of NDPs. This is demonstrated in this section where the results obtained with the models are compared with simulation results. This comparison is done under grid topology 2, and considering mobile devices moving from *Start* to *End* position following the red arrow in Figure 4-4. It is assumed for this analysis that  $t_{cov}$  is the time a mobile device needs to go from *Start* to *End*. It is considered for the analytical performance models that a DLPDU is not correctly received if two or more devices simultaneously transmit on the same link (independently of the interference level). Figure 4-5 represents the discovery probability ( $P_{disc}$ ) between the mobile device and *Network Manager*. The results obtained for WH, LAN and LANm<sup>10</sup> show a close match between the results obtained using the analytical performance models (*Ana*) and the simulations (*Sim*). These results validate the proposed models and their usability to obtain first insights into the performance trends of NDPs.

<sup>10</sup> LCA is only analyzed through simulations due to its discovery process.

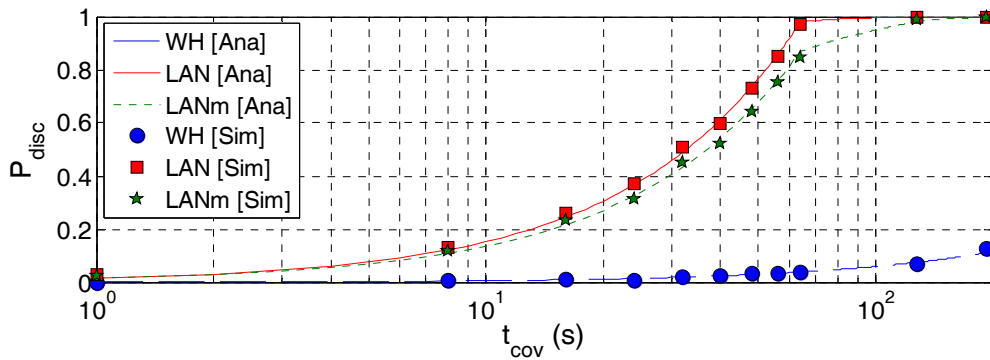


Figure 4-5. Discovery probability ( $P_{disc}$ ) for grid topology 2 with  $d=30m$  and  $T_N=64s$ .

#### 4.5.4 Simulation results

Figure 4-6 represents the probability that a given device  $i$  discovers another device  $j$  or vice versa ( $P_{disc}$ ) for a range of  $t_{cov}$  values. These results are obtained in grid topology 1 with mobile devices following a random waypoint trajectory and considering  $T_N=64s$  (left) and  $T_N=16s$  (right).  $T_N=64s$  is the default duration of the WirelessHART *Management Superframe*. The obtained results show that the protocols that exploit the transmission of *Advertise* DLPDUs for the discovery process achieve similar results. Their performance is significantly higher than that achieved with the standard WH protocol. The performance of the LANm protocol is slightly lower than that of LAN and LCA. This is due to the fact that static devices implementing LANm only make use of *Discovery Links* to discover neighbor devices, but LAN and LCA utilize *Advertise Links* for both static and mobile devices. It is interesting to note that LAN and LCA present nearly the same performance despite the fact that LCA devices are only scheduled to listen for their two-hop neighbor *Advertise* DLPDUs. Similar trends to those reported in Figure 4-6 have been observed for different  $PDR_{min}$  values, grid topologies and node densities.

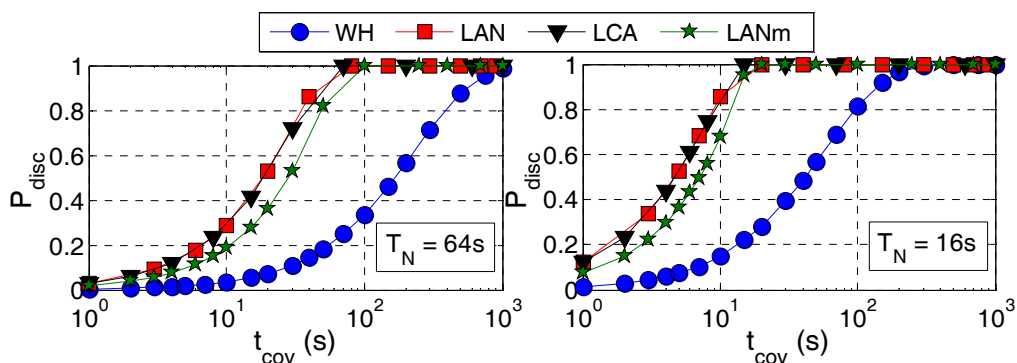


Figure 4-6. Discovery probability ( $P_{disc}$ ) with  $PDR_{min}=0.95$ ,  $d=60m$  and  $M=1$  in grid topology 1.

Table 4-2 presents the time required to detect a neighbor ( $t_{det}$ ) as a function of  $T_N$  considering a single mobile device ( $M=1$ ) in grid topologies 1, 2 and 3 under realistic propagation and interference conditions, and considering again mobile devices with random trajectories. The table shows average values and the 99<sup>th</sup> percentiles in order to identify upper performance bounds considering propagation and interference effects and the fact that WH is based on a probabilistic discovery scheme. Table 4-2 shows that the average time needed by WH to detect a neighbor is around 25 times higher than the time needed by LAN, LCA and mobile devices that employ LANm<sup>11</sup>. The simulated scenarios consider a significant larger portion of static devices. This explains why when averaging the time needed to detect neighbors for all LANm devices the performance levels are close to those observed with WH. Table 4-2 also shows that the time increases for WH with the number of total devices in the scenario due to the interference levels experienced in the *Discovery Links*. The increase is not significant for LAN, LCA and mobile devices employing LANm. These trends are consistent with those that can be inferred from eq. (4-24) since protocols with lower  $P_{i,j}^{H,S}$  (i.e. WH) need more time to detect a neighbor. Table 4-2 also depicts the results that could be obtained with WH when considering a *Discovery Link* per static or mobile device (referred to as WH\*). This allows comparing a probabilistic NDP scheme (WH) with deterministic NDP schemes (LAN, LCA y LANm) using the same number of radio resources or links for the discovery process. In this case, WH\* can significantly reduce the average time to detect a neighbor. However, this is obtained at the cost of a significant increase in the number of radio resources exclusively reserved for the discovery process (e.g. WH\* requires 37 *Discovery Links* in grid topology 3). This is in contrast to the deterministic schemes that achieve similar performance levels to those observed with WH\*, but using a lower number of radio resources.

Figure 4-7 illustrates the probability that a mobile device remains connected to the network while it moves from *Start* to *End* position along a corridor ( $P_{conn}$ ). The probability is depicted as a function of the speed of the mobile device ( $v$ ). For a fair comparison, WH and LANm are here configured with the  $DLN_i$  value that maximizes  $P_{conn}$  ( $DLN_i=3$  for WH and  $DLN_i=6$  for LANm). This value differs from the one that maximizes  $P_{i,j}^H$ . The obtained results show that WH is not able to maintain the mobile node

---

<sup>11</sup> As an example, the average time employed by WH to detect a neighbor device is around 12 minutes considering a superframe of 64s and a mobile device speed of 1m/s in grid topology 1. In 12 minutes, the distance travelled by the mobile device is 720m. The neighbors of the mobile device at position 0m and at position 720m will totally differ. With the proposed protocols (LAN, LCA and LANm), the distance travelled would be reduced to around 35m.

connected to the network as it moves along the corridor, even under low speed values. On the other hand, the protocols that exploit *Advertise Links* to discover neighbor devices can better maintain the network connectivity of mobile devices. This is specially the case for low  $T_N$  values as they result in a higher number of *Keep-alive* and *Advertise* DLPDUs sent and received per unit of time.

Table 4-2. Time to detect a neighbor  $t_{det}$  (s).

Metric	Grid topology	WH	WH*	LAN	LCA	LANm (All devices)	LANm (only mobile devices)
Average	1	$11.378 \cdot T_N$	$0.669 \cdot T_N$	$0.518 \cdot T_N$	$0.523 \cdot T_N$	$10.738 \cdot T_N$	$0.495 \cdot T_N$
	2	$12.811 \cdot T_N$	$0.493 \cdot T_N$	$0.518 \cdot T_N$	$0.524 \cdot T_N$	$12.337 \cdot T_N$	$0.497 \cdot T_N$
	3	$14.274 \cdot T_N$	$0.386 \cdot T_N$	$0.518 \cdot T_N$	$0.527 \cdot T_N$	$13.902 \cdot T_N$	$0.499 \cdot T_N$
99th percentile	1	$54.284 \cdot T_N$	$3.193 \cdot T_N$	$1.438 \cdot T_N$	$1.561 \cdot T_N$	$53.692 \cdot T_N$	$1.365 \cdot T_N$
	2	$62.959 \cdot T_N$	$2.422 \cdot T_N$	$1.438 \cdot T_N$	$1.597 \cdot T_N$	$62.708 \cdot T_N$	$1.369 \cdot T_N$
	3	$71.691 \cdot T_N$	$1.938 \cdot T_N$	$1.438 \cdot T_N$	$1.636 \cdot T_N$	$71.058 \cdot T_N$	$1.378 \cdot T_N$

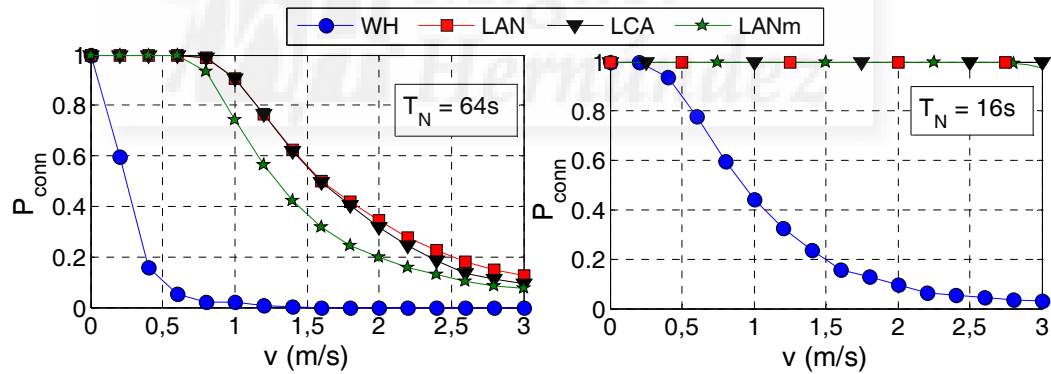


Figure 4-7.  $P_{conn}$  as a function of the speed of the mobile device ( $v$ ). Grid topology 1 with  $d=60m$  and  $PDR_{min}=0.95$ .

The probability that a mobile device remains connected to the network while moving around the scenario can be improved with higher densities of static devices. Figure 4-8 illustrates  $P_{conn}$  for  $d=30m$  and grid topology 1. The comparison of Figure 4-7 and Figure 4-8 shows how  $P_{conn}$  increases for WH with higher densities. However, even with higher densities, WH can only successfully maintain the connectivity when mobile devices move at low speeds. A higher density of static devices also helps LAN, LCA and LANm to overcome the limitations resulting from using long *Management Superframes* ( $T_N=64s$ ).



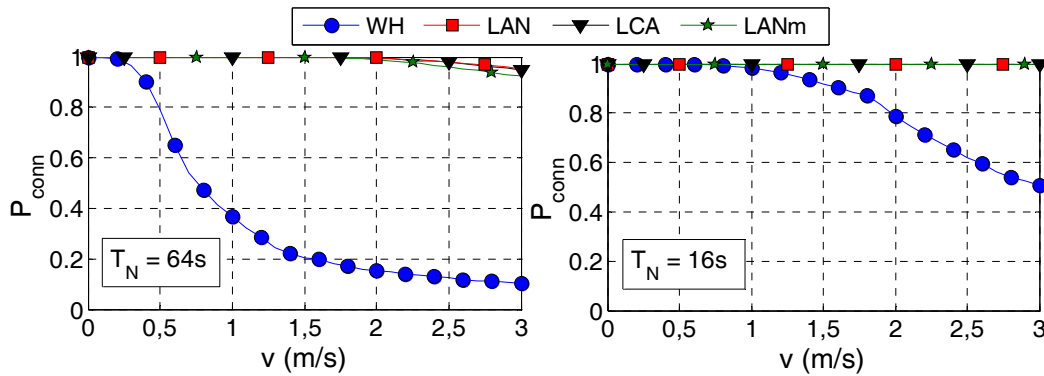


Figure 4-8.  $P_{conn}$  as a function of the speed of the mobile device ( $v$ ). Grid topology 1 with  $d=30m$  and  $PDR_{min}=0.95$ .

Figure 4-9 represents  $P_{conn}$  as a function of the speed of the mobile device while it moves from *Start* to *End* position along a corridor for different  $PDR_{min}$  values. All protocols improve  $P_{conn}$  when  $PDR_{min}$  is reduced since devices can discover each other at larger distances. However, reducing  $PDR_{min}$  decreases the minimum link quality required to discover a neighbor, and therefore decreases the average QoS. WH again shows the lowest performance compared to the protocols that exploit *Advertise* DLPDUs to discover neighbor devices. Higher probabilities can be obtained with  $T_N=16s$  following the trends exhibited in Figure 4-7 and Figure 4-8.

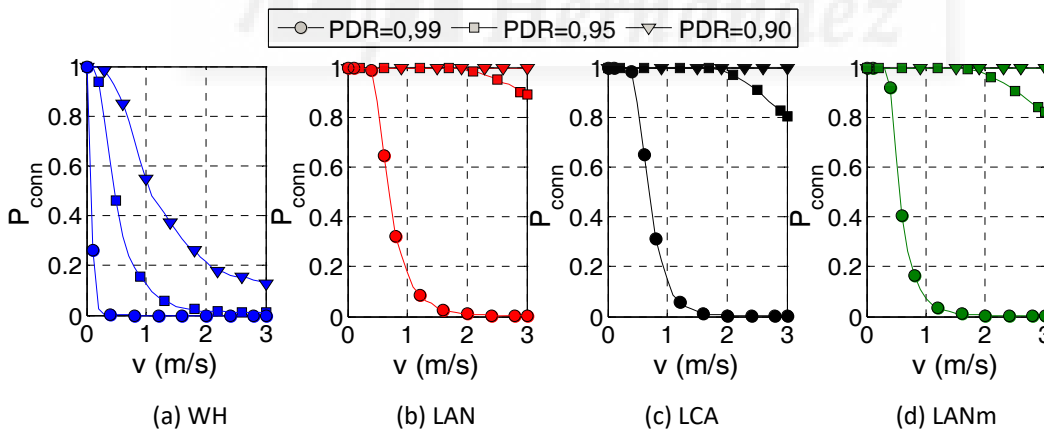


Figure 4-9.  $P_{conn}$  as a function of the speed of the mobile device ( $v$ ). Grid topology 3 with  $T_N=64s$  and  $d=30m$ .

The previous results have shown that the protocols that exploit *Advertise* DLPDUs to detect neighbor devices generally achieve similar performance levels. The differences between the protocols appear when analyzing their efficiency. Figure 4-10 represents the average *NBC* per *Management Superframe* as a function of the elapsed time  $t$  when



considering mobile devices that move following a random waypoint trajectory. The results shown in Figure 4-10 correspond to the average  $NBC$  values obtained for all simulated scenarios (including the various  $d$ ,  $M$  and  $PDR_{min}$  values analyzed in the study). Part of the  $NBC$  generated by the proposed protocols is only produced in the initial *Management Superframe* (to schedule devices). As a result, the average  $NBC$  decreases with the elapsed time. Figure 4-10 shows that the  $NBC$  for WH depends on the number of active channels but not on the elapsed time. LANm results in an  $NBC$  very similar to that of WH (especially for large values of  $t$ ) since both protocols only differ on the operation of mobile devices, and the ratio of mobile to static devices is low. This effect can also be observed from the derived analytical performance models, in particular eq. (4-26) and (4-29). It is interesting to note that for large values of  $t$ , LCA offers the lowest total  $NBC$ . This is the case because for large values of  $t$  the  $NBC$  generated at the initial *Management Superframe* to schedule all *Advertise Links* becomes negligible (second term in eq. (4-28)), and the main contributions to the total  $NBC$  are the additional information (2 Bytes per neighbor) introduced in all *Advertise DLPDUs* (first term in eq. (4-28)) and the  $NBC$  resulting from the fact that one-hop and two-hop neighbors need to be in reception mode to receive the corresponding *Advertise Link* (third term in eq. (4-28)). This results in a lower total  $NBC$  for LCA than e.g. WH for large values of  $t$ . The  $NBC$  for WH is independent of  $t$  and takes into account that all devices need to be in reception mode during the *Discovery Link*, thus blocking the use of all channels during the *Discovery Link* for other functions. Figure 4-10 shows that LAN results in the highest  $NBC$  since it requires all devices to listen for each other's *Advertise DLPDUs*, and the use of other frequency channels in the time slots where *Advertise DLPDUs* are transmitted is hence blocked.

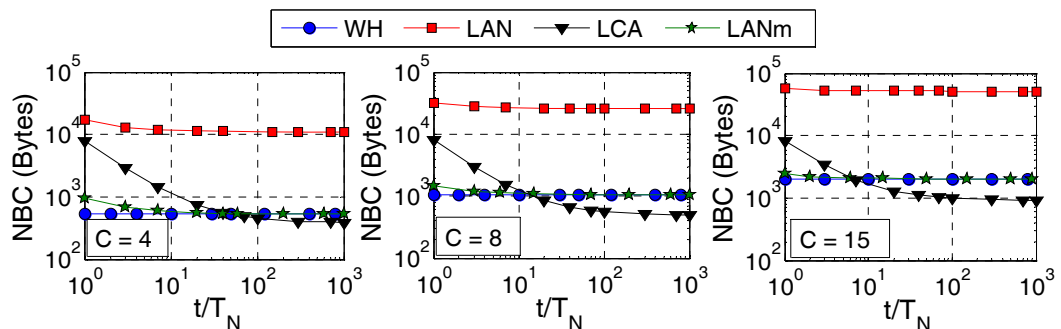


Figure 4-10. Average  $NBC$  as a function of the elapsed time  $t$  for different number of active frequency channels  $C$ .

Table 4-3 presents the total number of links used for neighbor discovery per *Management Superframe* (*Total* in Table 4-3). This includes the *Advertise Links* for LAN and LCA, the *Advertise* and *Discovery Links* for LANm, and the *Discovery Links* for WH. Table 4-3 also shows the number of dedicated *Discovery Links* that nodes utilize to transmit packets used in the discovery process. Finally, Table 4-3 includes the number of links during which each device needs to be in reception mode to receive a packet used in the discovery process (*Reception*). This is equal to the number of *Discovery Links* for WH and the static devices in LANm. When using LAN, each device must be in reception mode for the *H-1 Advertise Links* of the rest of *H-1* network devices. With LCA, each device must only be in reception mode for the *Advertise Links* of its one-hop or two-hop neighbors ( $H_{h2}$ ). Mobile devices in LANm must be in reception mode for the *Discovery Link* and the *H-1 Advertise Links* of the rest of *H-1* network devices. Table 4-3 shows that the proposed techniques (LCA and LANm) use more links than WH for the discovery process. However, they do not dedicate exclusively for the discovery process more radio resources than WH (LCA even less). Instead, they use other radio resources (*Advertise Links*) that already exist in WirelessHART, which improves the utilization of radio resources.

Table 4-3. Links for neighbor discovery per *Management Superframe*.

	WH	LAN	LCA	LANm (static)	LANm (mobile)
Total	1	$H$	$H$	1	$1+H$
Dedicated <i>Discovery Links</i>	1	0	0	1	1
Reception	1	$H-1$	$H_{h2}$	1	$H$

Table 4-4 compares the energy consumed per device ( $E_d$ ) by the different protocols for each grid topology and different number  $M$  of mobile devices. The results have been obtained considering 1000 *Management Superframes* ( $t/T_N = 1000$ ). The results show that the average energy consumed per device increases with the number of devices since devices need to listen and receive more *Advertise* or *Keep-alive* DLPDUs. The results obtained also show that WH presents the lowest average energy consumption. Only LANm has an energy consumption level similar to that achieved by WH when no mobile devices are deployed. The deployment of mobile devices increases the average energy consumption, especially for LAN and LCA. As it could be foreseen from eq. (4-30)-(4-33), the highest energy consumption is obtained with LAN since LCA and LANm reduce the number of devices that actively participate in the discovery process. LANm is the proposed protocol that achieves the lowest energy consumption. LCA and LANm

significantly reduce the energy consumption with respect to LAN (by 50% and 96%, respectively). WH consumes less energy for the discovery process. However, LCA and LANm significantly improve the probability to detect neighbor devices and the time to do so. It is also important noting that the energy consumed by the deterministic NDP schemes in the discovery process is relatively small. For example, the energy consumed by LAN during the discovery process in grid topology 3 is equivalent to 0.03% of the energy a node would consume if transmitting and receiving packets continuously.

Table 4-4. Average energy consumed per device and per *Management Superframe*  $E_d$  ( $\mu$ J).

Grid topology	M	WH	LAN	LCA	LANm
1	0	54.1	684.0	543.5	54.1
	1	54.2	728.9	570.2	97.0
	5	54.7	906.5	650.3	269.1
2	0	54.4	1077.5	700.7	54.4
	1	54.5	1121.6	716.9	97.6
	5	54.8	1297.3	770.7	270.3
3	0	54.8	1558.9	867.1	54.8
	1	54.9	1602.7	877.9	98.1
	5	55.0	1777.5	915.2	271.5

## 4.6 Conclusions

In this chapter, three novel neighbor discovery protocols for industrial wireless networks that include mobile devices have been proposed and evaluated. The proposed protocols exploit *Advertise* DLPDUs, information about the network topology and the nature of devices (static or mobile) to improve the capacity to detect neighbor devices while efficiently utilizing the radio resources. The proposed protocols have been developed for the WirelessHART standard given its important industrial adoption. However, it should be noted that the proposed schemes can be adapted for the ISA100.11a and IEEE 802.15.4e standards since they maintain WirelessHART's passive listening scheme for neighbor discovery, and introduce a scanning scheme with active solicitations for the advertisements.

This study has also presented accurate analytical performance models for all the neighbor discovery protocols under evaluation, including the protocol embedded in the WirelessHART standard. These models can easily provide first insights into the

performance and operation of the proposed protocols. A thorough evaluation of the neighbor discovery protocols has then been conducted through simulations to account for realistic mobility, radio propagation, deployment and operating conditions. The conducted evaluation has shown that the proposed neighbor discovery protocols significantly improve the capacity of mobile devices to discover neighbor devices, and reduce the probability of mobile devices to lose network connectivity compared to the existing WirelessHART solution. In particular, the proposed neighbor discovery protocols result in that mobile devices can detect neighbor devices up to 25 times faster than with the WirelessHART NDP. These benefits are generally achieved at the expense of a lower efficiency or higher energy consumption compared to the current WirelessHART NDP. The results obtained show that the LANm proposal achieves the best trade-off between performance, efficiency and energy consumption. This proposal significantly improves the capacity of mobile devices to detect neighbor devices, and achieves energy consumption and efficiency levels very close to those obtained with the WirelessHART NDP protocol.



# 5

## Asignación de enlaces de comunicación

Industrial applications are generally characterized with strict reliability and latency requirements, which represents a critical and challenging problem when considering industrial wireless networks and mobile devices. The results obtained in chapter 3 show that the link scheduling process can be key to achieve the necessary reliability and latency levels in an industrial wireless network. In WirelessHART, link scheduling is the process used by the *Network Manager* to assign the time slots and channel frequencies to establish the necessary communication links between all devices, both static and mobile. It is important noting that the WirelessHART and ISA100.11a standards do not specify any link scheduling scheme, but define instead a number of requirements that must be fulfilled [10]. As presented in section 2.5, one of such requirements for WirelessHART is that the scheduling scheme must assign at least three links per hop for attempting to transmit each message before its given transmission deadline. The first two attempts (i.e., the original transmission and one retransmission) utilize the same main path or route between the source and destination nodes. The third transmission attempt should be done over an alternative path. When scheduling links for a path, early hops should be scheduled first. The WirelessHART standard also specifies that no device can be scheduled to be in reception mode in two different channels during one time slot. Standards such as WirelessHART and ISA100.11a assign each node a fixed number

of links per hop to transmit a message. The utilization of these links depends on the link quality conditions and on the number of retransmissions needed per transmitted message. A fixed assignment of links per hop might not be able to ensure high reliability levels if some hops experience particularly bad link quality conditions. It can also result in unnecessarily high latency and in an inefficient utilization of the links under good radio link quality conditions.

In this context, this chapter proposes and evaluates a novel link scheduling scheme that efficiently assigns and utilizes links in multi-hop industrial wireless network communications. The proposed scheme is based on the concepts of shared links and virtual tokens. The proposed scheme uses shared links among nodes that are part of the same path or multi-hop route. The transmission of a message in the path acts as a virtual token to identify which node is allowed to transmit at each point in time in the shared links. The conducted study demonstrates that the proposed link scheduling scheme can improve the reliability and latency performance compared to existing link scheduling schemes for industrial wireless networks even when mobile devices are considered. In addition, the proposed scheme makes a more efficient use of resources (links and energy). The proposed link scheduling scheme is here applied to industrial wireless network, but it is important emphasizing that it can be used in other centralized TDMA-based multi-hop wireless networks.

The rest of the chapter is organized as follows. Section 5.1 reviews the state of the art on scheduling in industrial wireless networks. Section 5.2 describes the proposed link scheduling scheme, and Section 5.3 describes the metrics utilized to evaluate its performance. Section 5.4 presents analytical performance models for the different link scheduling schemes. In particular, it presents analytical expressions of the reliability and latency performance. Section 5.5 presents the results obtained with the proposed scheme, and compares its performance with different existing link scheduling schemes. The main contributions and conclusions of this study are summarized in Section 5.6.

## 5.1 State of the art

Centralized and decentralized scheduling schemes have been proposed in the literature for multi-hop wireless sensor networks [43] [44]. Decentralized schemes rely on nodes with certain intelligence and partial knowledge of their neighborhood and network status. Such knowledge is utilized for distributed decision making processes. Decentralized schemes can in principle better react to changes in the network operation

and dynamics [45]. Many decentralized proposals have been designed to minimize the average time needed to transmit a message between source and destination. For example, the scheme presented in [46] exploits information obtained by nodes from their local neighborhood to assign links without any transmission collisions. A different approach is followed by the decentralized scheme presented in [47] where the destination node is responsible for assigning links based on the characteristics of the traffic generated by the source node. The decentralized schemes generally offer more flexibility and capacity to adapt to network conditions than their centralized counterparts. However, centralized schemes are more suitable for industrial wireless networks that have strict reliability and latency requirements [48] and utilize a centralized architecture and network management [49].

In centralized schemes, all scheduling decisions are taken by a central node (e.g. the *Network Manager* in WirelessHART), and the remaining nodes are only responsible for the radio transmission and reception of messages, and some limited data processing functions. It is important to remember that standards such as WirelessHART do not include or define any scheduling scheme, but define instead a number of requirements that must be fulfilled. Different centralized scheduling schemes have been reported in the literature. For example, the study in [50] proposes a graph route-based link scheduling scheme to handle transmission errors using retransmissions and route diversity. A graph is a collection of paths among network nodes. The graph identifies more than one route between any pair of source and destination nodes. A different approach is reported in [51] for the case in which it is necessary to assign links for the transmission of messages between a set of source and destination nodes (not a single pair). The scheduling schemes proposed in [51] seek ensuring that all transmission deadlines are met while avoiding conflicts between the concurrent transmissions. Most of the proposed centralized scheduling schemes address the link scheduling problem considering multiple possible paths between source and destination. When focusing on a single path, most of these schemes follow the concepts defined by the link scheduling schemes reported in [27] or [52]; these two schemes will hence be considered as reference schemes in this study.

The centralized link scheduling scheme presented in [27] assigns consecutively all the links to be utilized at each hop of a path. This includes the initial link to transmit the message from one node to the next one in the path, and the additional link for a potential retransmission of the message should the first transmission fail. This scheme is hence referred to as HbH (Hop by Hop). To illustrate its operation, it is considered the

example depicted in Figure 5-1a. The example represents a main path of three hops between the source and destination nodes (the number of hops is represented by the variable  $H$ ). WirelessHART indicates that two links should be assigned to each hop in the main path between source and destination. Following this requirement, Figure 5-1b represents the scheduling of links resulting from the application of HbH. The first link is assigned for the initial transmission of the message, and the second one for its potential retransmission should the initial transmission fail. In this case, the transmission of a message from node A to node B will utilize the first link  $l_1$ . The following link  $l_2$  is reserved for the possible retransmission of the same message from node A to node B in case the initial transmission was not successfully received at node B. Following the same principle, the following two links are reserved for the hop between node B and node C and so on. The scheme presented in [27] successfully delivers the message to the destination node as long as the number of transmission errors per hop is smaller than the number of links reserved to each hop. However, the sequential programming of all the links assigned to each hop increases the latency even in the absence of transmission errors.

An alternative scheme is presented in [52]; the scheme is here referred to as RTE (Retransmission afTEr). The scheme first assigns the links for the initial transmission of a message at each hop, and then the links for the possible retransmissions. Considering the example depicted in Figure 5-1a, RTE assigns the first link  $l_1$  to the transmission of a message from node A to node B (Figure 5-1c). Link  $l_2$  is assigned for the transmission of the same message from node B to node C and so on. Links  $l_4$ ,  $l_5$  and  $l_6$  are then reserved for possible retransmissions of the message from node A to node B, from node B to node C, and from node C to node D respectively. This scheme reduces the time to deliver a message in the absence of transmission errors, but also the reliability in the delivery of the message to the destination node. For example, if the transmission of the message from node A to node B using  $l_1$  fails, links  $l_2$  and link  $l_3$  cannot be utilized since the retransmission of the message from node A to node B (link  $l_4$ ) is programmed after  $l_2$  and  $l_3$ . If the retransmission using  $l_4$  is successful, nodes B and C will only have one attempt each (using links  $l_5$  and  $l_6$ ) to successfully transmit the message to node D.

The schemes reported in [27] and [52] offer advantages in terms of reliability or latency. However, as pointed out in [53], the capacity to jointly guarantee *end-to-end* reliability and latency for critical industrial applications is still an open research problem. This chapter progresses in this direction with the proposal of a novel link scheduling scheme that exploits the advantages of the schemes reported in [27] and [52] while



avoiding their drawbacks. The proposed scheme is based on a centralized network management, and is hence particularly suited for industrial wireless networks such as WirelessHART. The proposed scheme centrally assigns shared links to nodes that are part of the same path. However, the decision on which nodes should use a shared link at each point in time is distributed. In particular, the scheme proposes that transmitted messages act as virtual tokens to identify which node should utilize each shared link at each point in time based on the quality of previous transmissions. This hybrid (centralized and decentralized) approach provides the capacity to adapt the scheduling and utilization of links to the actual link quality conditions. This allows reducing the latency while maintaining the high reliability levels required by industrial applications. As it will be later shown, it also results in a more efficient use of resources (links and energy).

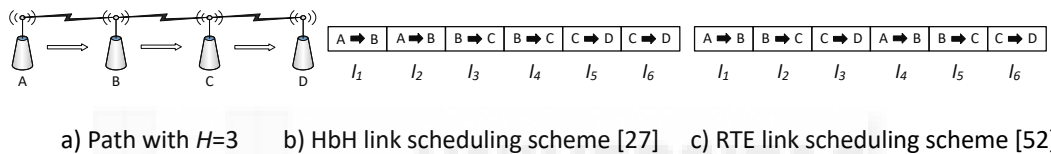


Figure 5-1. Centralized scheduling schemes.

## 5.2 Proposed link scheduling scheme

The proposed link scheduling scheme assigns links with certain flexibility in order to reduce the latency and increase the reliability in a path or multi-hop route. To this aim, the scheme proposes the use of shared links and the use of messages as virtual tokens. The scheme is referred to as LIKUID (LIInK schedULLing scheme with sharedLInks and virtual tokens). To explain its operation, let's consider the scenario illustrated in Figure 5-1a. and define  $R$  as the total number of message retransmissions allowed for the complete path by the proposed scheme. At the start of a transmission, all nodes in a path are in reception mode except for the source node<sup>12</sup>. The nodes should remain in reception mode for the following  $R$  links until they correctly receive the message that needs to be routed to the destination node. When a node correctly receives the message, it transmits it to the next node in the multi-hop route. The source node is assigned  $R+1$  links to transmit the message, and the destination node  $R+1$  links to receive the message. All relay nodes in a path (i.e. nodes B and C in Figure 5-1a) are assigned  $R+2$  links to receive and transmit the message as illustrated in Figure 5-2.

<sup>12</sup> Each node gets into reception mode in a different link. For example, node B gets into reception mode in  $l_1$ , while C and D do it in  $l_2$  and  $l_3$  respectively.



to the destination node in the time equivalent to  $H$  links if no transmission errors occur ( $H$  is the number of hops in the path). The same latency is ensured in an error-free environment by RTE. However, this scheme can only ensure the correct delivery of the message to the destination node if the total number of transmission errors is smaller than the number of links assigned for transmission to each node. HbH requires more time to deliver a message to the destination in the absence of transmission errors than LIKUID and RTE. In addition, HbH can only ensure the correct delivery of a message to the destination node if the number of transmission errors per hop is smaller than the total number of links (including retransmissions) assigned to each hop for the transmission of a message. LIKUID can also minimize the time to deliver a message to the destination node under the presence of transmission errors. This is the case because it does not delay retransmissions, and these can take place (using the message as virtual token) as soon as the transmission error is detected. RTE cannot minimize the time to deliver a message since retransmissions need to wait for a total of  $H$  links. LIKUID also maximizes the reliability for a given number of links ( $H+R$ ) assigned to a path or multi-hop route. This is the case because LIKUID can deliver the message to the destination node as long as the number of transmission errors is equal or smaller than  $R$  ( $R$  is equal for LIKUID to the total number of retransmissions allowed for the complete path). If there are  $R+1$  errors or more, no scheme with  $H+R$  links could deliver the message to the destination since it will need  $H+R+1$  transmissions.

The proposed scheme can be used in existing wireless industrial standards, in particular in WirelessHART and ISA100.11a. The scheme satisfies the WirelessHART requirements and should be utilized for the main path between source and destination nodes. This is the case because the WirelessHART standard only requires assigning links for possible retransmissions to the main path (such assignment is not mandatory for alternative paths). In this context, this study focuses on such main path and does not consider alternative paths. Such alternative paths would operate identically for all the schemes under study, and therefore the consideration or not of alternative paths does not affect the outcome of the present comparison study.

### 5.3 Metrics

The performance and efficiency of the different link scheduling schemes is evaluated using different metrics. Their reliability is measured using the end-to-end Packet Delivery Ratio ( $PDR_{E2E}$ ). This metric is computed as the ratio between the messages

correctly received at the destination node and the total number of messages transmitted by the source node.

The end-to-end delivery delay is another critical performance metric in industrial wireless networks. This metric ( $D_{E2E}$ ) is here estimated as the average number of links elapsed between the transmission of a message by the source node and its reception at the destination node. Without loss of generality, this study considers that all links utilized for the transmission of a message are allocated consecutively in a data superframe following the scheduling process defined by each scheme. The  $D_{E2E}$  metric is computed considering only the messages that are correctly received at the destination node.

This study defines several metrics to analyze how efficiently each scheduling scheme utilizes the available links. The first one is the number of total links that are assigned by each scheme for the complete path or multi-hop route. The more efficient schemes will be those that achieve a given reliability level assigning a smaller total number of links for the complete path. The second efficiency metric is the average percentage of links that have been utilized. This metric is estimated as the ratio between the number of links utilized for the transmission of a message in a multi-hop route and the total number of links assigned for such route. It is important noting that certain scheduling schemes can result in that many links are actually not utilized even when the message cannot reach the destination node. This depends on how links have been assigned and on the distribution of transmission errors in the route. The third efficiency metric is the number of blocked links defined as the number of links during which a node has to be in transmission or reception mode for each message that is transmitted from source to destination. It is important noting that a node can only simultaneously utilize (either for transmission or reception) a single link. As a result, when a link is assigned to a given node, the node cannot utilize other links for other functions (e.g. transmitting a message to a different node). The fourth metric is the number of Unnecessary Reception Attempts (URA). This metric computes the number of times that a node was unnecessarily in reception mode for each message successfully delivered to the destination node. This can occur for example if a message that is being transmitted is not addressed to the node that is in reception mode, or simply because no message is being transmitted in the link during which the node is in reception mode. These circumstances clearly represent inefficiencies as the node could have been in sleep mode or undertaking other more productive tasks.

Finally, this study also evaluates the energy consumption of the different link scheduling schemes. The energy consumption is here estimated as the average energy consumed per message correctly received at the destination node ( $E_{PMD}$ ). This metric has been selected instead of the total energy consumption in order to reduce the influence of the  $PDR_{E2E}$  on the analysis of the energy efficiency<sup>14</sup>.

## 5.4 Analytical performance modeling

This section presents analytical performance models for the different link scheduling schemes. In particular, it presents analytical expressions of the reliability and latency performance. These expressions have been obtained for a path or multi-hop route with  $H$  hops between the source and destination nodes. The expressions have been derived for HbH and RTE considering that two links are assigned per hop. The expressions for LIKUID have been derived when  $R$  is set equal to 1, 2 and 3.

### 5.4.1 Reliability

Let's denote  $PDR_i$  as the PDR estimated for hop  $i$ . If it is considered a stationary PDR at each hop,  $PDR_{E2E}$  can be estimated analytically.

HbH assigns all the links to a given hop (including links for retransmissions) before the links for the following hop. The probability  $P_i$  to correctly transmit a message in hop  $i$  (whether using the first assigned link to this hop or the link assigned for retransmissions) can be expressed as:

$$P_i = 1 - (1 - PDR_i)^{L_i} \quad (5-1)$$

where  $L_i$  represents the number of links assigned to hop  $i$  (two links per hop are considered in this study). Let's consider that the  $PDR_i$  experienced at each hop of the path is independent of each other. In this case, it is possible to estimate  $PDR_{E2E}$  for HbH using (5-1):

$$PDR_{E2E}|_{HbH} = \prod_{i=1}^H P_i = \prod_{i=1}^H (1 - (1 - PDR_i)^2) \quad (5-2)$$

RTE assigns first the links for the initial transmission of a message at each hop, and then the links for the potential retransmissions. Let's define  $P_{0-rtx}$  as the probability that

<sup>14</sup> For example, if a scheme delivers very few messages to the destination node, it will consume less energy than a scheme that delivers most of the messages to the destination since fewer transmissions will take place.

the message reaches the destination node without requiring any retransmissions in the path from source to destination.  $P_{0-rtx}$  can be expressed as:

$$P_{0-rtx} = \prod_{i=1}^H PDR_i \quad (5-3)$$

Let's define  $P_{rtx-h}$  as the probability that the message reaches the destination node following a retransmission of the message in hop  $h$ .  $P_{rtx-h}$  can be expressed as:

$$P_{rtx-h} = (1 - PDR_h) \cdot \prod_{i=1}^H PDR_i \quad (5-4)$$

where  $(1 - PDR_h)$  represents the probability that the message is first not correctly transmitted in hop  $h$  and a retransmission is necessary. It can be computed the probability  $P_{1-rtx}$  that the message is correctly received at the destination node after a single retransmission at any of the  $H$  hops of the path. This probability is equal to the sum of the  $P_{rtx-h}$  probabilities for all the  $H$  hops in the path:

$$P_{1-rtx} = \sum_{h=1}^H P_{rtx-h} = \left( \prod_{i=1}^H PDR_i \right) \cdot \left( \sum_{i=1}^H (1 - PDR_i) \right) \quad (5-5)$$

$PDR_{E2E}$  can then be estimated for RTE as<sup>15</sup>:

$$PDR_{E2E}|_{RTE} = P_{0-rtx} + P_{1-rtx} = \left( \prod_{i=1}^H PDR_i \right) \cdot \left( 1 + \sum_{i=1}^H (1 - PDR_i) \right) \quad (5-6)$$

It is possible to obtain for LIKUID an analytical expression of  $PDR_{E2E}$  that is a function of  $R$  (total number of message retransmissions allowed for the complete path). When  $R$  is set equal to one (i.e. only one retransmission is allowed), the message is delivered to the destination node if there are no transmission errors ( $P_{0-rtx}$  in eq. (5-3)) or there is only one transmission error ( $P_{1-rtx}$  in eq. (5-5)). The  $PDR_{E2E}$  of LIKUID when  $R$  is equal to one is then the sum of  $P_{0-rtx}$  and  $P_{1-rtx}$ , and its value is represented by eq. (5-6). When  $R$  is set equal to 2, the message can also be delivered to the destination node if there are two retransmissions in total (independently of the hop in which they take place). Following the same process used to define  $P_{1-rtx}$ , it can be computed the probability  $P_{2-rtx}$  that the message is correctly received at the destination node after two retransmissions:

$$P_{2-rtx} = \left( \prod_{i=1}^H PDR_i \right) \cdot \left( \sum_{i=1}^H \sum_{j=i}^H (1 - PDR_i) \cdot (1 - PDR_j) \right) \quad (5-7)$$

<sup>15</sup> It is important to remember that when RTE is configured with two links per hop, it will not be able to deliver the message to the destination node if there are more than two transmission errors.

Following the same process, it can be also computed  $P_{3-rx}$ :

$$P_{3-rx} = \left( \prod_{i=1}^H PDR_i \right) \cdot \left( \sum_{i=1}^H \sum_{j=i}^H \sum_{k=j}^H (1 - PDR_i) \cdot (1 - PDR_j) \cdot (1 - PDR_k) \right) \quad (5-8)$$

Finally, the  $PDR_{E2E}$  for LIKUID can then be expressed as function of  $R$  following eq.(5-9):

$$PDR_{E2E}|_{LIKUID} = \begin{cases} P_{0-rx} + P_{1-rx} = \left( \prod_{i=1}^H PDR_i \right) \cdot \left( 1 + \sum_{i=1}^H (1 - PDR_i) \right) & \text{if } R=1 \\ P_{0-rx} + P_{1-rx} + P_{2-rx} = \left( \prod_{i=1}^H PDR_i \right) \cdot \left( 1 + \left( \sum_{i=1}^H (1 - PDR_i) \right) + \left( \sum_{i=1}^H \sum_{j=i}^H (1 - PDR_i) \cdot (1 - PDR_j) \right) \right) & \text{if } R=2 \\ P_{0-rx} + P_{1-rx} + P_{2-rx} + P_{3-rx} = \left( \prod_{i=1}^H PDR_i \right) \cdot \left( 1 + \left( \sum_{i=1}^H (1 - PDR_i) \right) + \left( \sum_{i=1}^H \sum_{j=i}^H (1 - PDR_i) \cdot (1 - PDR_j) \right) + \left( \sum_{i=1}^H \sum_{j=i}^H \sum_{k=j}^H (1 - PDR_i) \cdot (1 - PDR_j) \cdot (1 - PDR_k) \right) \right) & \text{if } R=3 \end{cases} \quad (5-9)$$

#### 5.4.2 Latency

If the PDR experienced at each hop  $i$  ( $PDR_i$ ) is considered stationary, it is possible to derive  $D_{E2E}$  analytically as a function of the number  $H$  of hops between the source and destination nodes.

HbH assigns consecutively all the links to be utilized at each hop of a path. The links assigned to the final hop are then placed at the end. The  $D_{E2E}$  metric can be computed for HbH as the sum of two delay components  $D_0$  and  $D_1$ .  $D_0$  is the end-to-end delay experienced when the message reaches the destination node without needing a retransmission at the last hop.  $D_1$  is the end-to-end delay experienced when the message reaches the destination node after a retransmission at the last hop.  $D_0$  is obtained by multiplying the probability that the message reaches the last relay node by the probability that the message correctly reaches the destination node without needing a retransmission at the last hop ( $PDR_H$ ) and by the corresponding delay  $(2(H-1)+1)$ . The result of this multiplication is then divided by  $PDR_{E2E}$  to obtain  $D_0$ .  $D_1$  is obtained multiplying the probability that the message reaches the last relay node by the probability that the message correctly reaches the destination node after a retransmission at the last hop ( $PDR_H$ ) and by the corresponding delay  $2H$ . The result of this multiplication is then divided by  $PDR_{E2E}$  to obtain  $D_1$ . The  $D_{E2E}$  metric can then be expressed as:

$$D_{E2E}|_{HbH} = D_0 + D_1 = \frac{\left( \prod_{i=1}^{H-1} (1 - (1 - PDR_i)^2) \right) \cdot PDR_H \cdot (2 \cdot (H - 1) + 1)}{\prod_{i=1}^H (1 - (1 - PDR_i)^2)} + \frac{\left( \prod_{i=1}^{H-1} (1 - (1 - PDR_i)^2) \right) \cdot (1 - PDR_H) \cdot PDR_H \cdot (2 \cdot H)}{\prod_{i=1}^H (1 - (1 - PDR_i)^2)} \quad (5-10)$$

It is possible to simplify eq. (5-10) and obtain a  $D_{E2E}$  metric for HbH that only depends on  $PDR_H$  and  $H$ :

$$D_{E2E}|_{HbH} = \frac{PDR_H \cdot (2 \cdot (H-1) + 1)}{(1 - (1 - PDR_H)^2)} + \frac{(1 - PDR_H) \cdot PDR_H \cdot (2 \cdot H)}{(1 - (1 - PDR_H)^2)} = \frac{PDR_H \cdot ((2 \cdot (H-1) + 1) + (1 - PDR_H) \cdot (2 \cdot H))}{(1 - (1 - PDR_H)^2)} \quad (5-11)$$

The  $D_{E2E}$  metric for RTE can be expressed as follows:

$$D_{E2E}|_{RTE} = \frac{P_{0-rx} \cdot H}{PDR_{E2E}|_{RTE}} + \frac{P_{1-rx} \cdot 2 \cdot H}{PDR_{E2E}|_{RTE}} = \frac{\left( \prod_{i=1}^H PDR_i \right) \cdot H + \left( \prod_{i=1}^H PDR_i \right) \cdot \left( \sum_{i=1}^H (1 - PDR_i) \right) \cdot (2 \cdot H)}{\left( \prod_{i=1}^H PDR_i \right) \cdot \left( 1 + \left( \sum_{i=1}^H (1 - PDR_i) \right) \right)} = \frac{\left( H + (2 \cdot H) \cdot \left( \sum_{i=1}^H (1 - PDR_i) \right) \right)}{\left( 1 + \left( \sum_{i=1}^H (1 - PDR_i) \right) \right)} \quad (5-12)$$

The first term in eq.(5-12) is equal to the probability  $P_{0-rx}$  (eq. (5-3)) multiplied by the related delay ( $H$ ) and divided by  $PDR_{E2E}$ . The second term is equal to the probability  $P_{1-rx}$  (eq. (5-5)) multiplied by the corresponding delay ( $2 \cdot H$ ) and divided by  $PDR_{E2E}$ .

The  $D_{E2E}$  metric for LIKUID can be obtained as the sum of  $R+1$  terms:

$$D_{E2E}|_{LIKUID} = \begin{cases} \frac{H \cdot P_{0-rx} + (H+1) \cdot P_{1-rx}}{PDR_{E2E}|_{LIKUID(R=1)}} = \frac{\left( \prod_{i=1}^H PDR_i \right) \cdot H + \left( \prod_{i=1}^H PDR_i \right) \cdot \left( \sum_{i=1}^H (1 - PDR_i) \right) \cdot (H+1)}{\left( \prod_{i=1}^H PDR_i \right) \cdot \left( 1 + \sum_{i=1}^H (1 - PDR_i) \right)} = \frac{\left( H + (H+1) \cdot \left( \sum_{i=1}^H (1 - PDR_i) \right) \right)}{\left( 1 + \sum_{i=1}^H (1 - PDR_i) \right)} & \text{if } R=1 \\ \frac{H \cdot P_{0-rx} + (H+1) \cdot P_{1-rx} + (H+2) \cdot P_{2-rx}}{PDR_{E2E}|_{LIKUID(R=2)}} = \frac{\left( H + (H+1) \cdot \left( \sum_{i=1}^H (1 - PDR_i) \right) + (H+2) \cdot \sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^H (1 - PDR_i) \cdot (1 - PDR_j) \right)}{\left( 1 + \left( \sum_{i=1}^H (1 - PDR_i) \right) + \left( \sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^H (1 - PDR_i) \cdot (1 - PDR_j) \right) \right)} & \text{if } R=2 \end{cases} \quad (5-13)$$

When  $R$  is equal to 1, the first term in eq. (5-13) results from the multiplication of the probability  $P_{0-rx}$  (eq. (5-3)) by the corresponding delay ( $H$ ) divided by  $PDR_{E2E}$ . The second term in eq. (5-13) results from the multiplication of the probability  $P_{1-rx}$  (eq. (5-5)) by the corresponding delay ( $H+1$ ) divided by  $PDR_{E2E}$ . When  $R$  is equal to 2,  $D_{E2E}$  is obtained summing a third term that is the result of multiplying the probability  $P_{2-rx}$  by its corresponding delay ( $H+2$ ) divided by  $PDR_{E2E}$ . The same process is followed to obtain  $D_{E2E}$  for higher values of  $R$ <sup>16</sup>.

## 5.5 Performance evaluation

The performance of the proposed link scheduling scheme is compared against that obtained with HbH and RTE. The evaluation done also considers a fourth simple scheduling scheme that does not consider retransmissions. This scheme, referred to as

<sup>16</sup> When  $R$  is equal to 3, it is necessary to add an additional term that results from the multiplication of  $P_{3-rx}$  (eq. (5-8)) by its corresponding delay ( $H+3$ ) divided by  $PDR_{E2E}$ .



NoRtx (No Retransmission scheduling scheme), only needs to assign one link to each hop in a path. Its evaluation is here included to highlight the impact of retransmissions.

All schemes are analyzed under the four multi-hop scenarios depicted in Figure 5-3. The four scenarios represent the deployment of nodes along a typical corridor that is characteristic of factories. The reliability and latency performance of the scheduling schemes has been numerically evaluated in scenarios 1 and 2 using the analytical expressions presented in the previous section. On the other hand, the efficiency and energy are obtained through simulations using the Monte Carlo method. The schemes are evaluated (for all the metrics) through simulations in scenarios 3 and 4. To ensure the statistical accuracy of the obtained results, sufficient numerical and simulation runs have been executed in order to achieve a relative error below 1% for all results in the four scenarios.

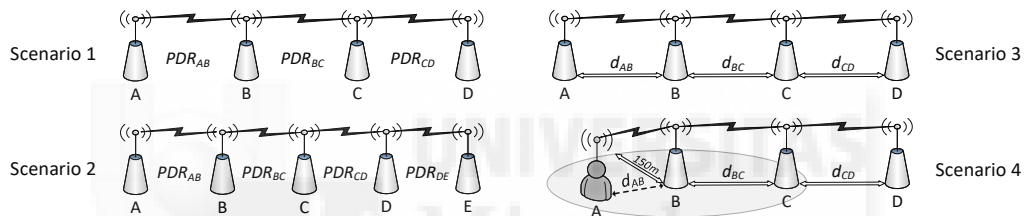


Figure 5-3. Evaluation scenarios.

The first scenario considers a path or multi-hop route with  $H=3$  and the same PDR experienced in each hop (i.e.  $PDR_{AB}=PDR_{BC}=PDR_{CD}$ ). The first scenario has been selected to analyze the performance of the proposed schemes under different link quality levels by changing the PDR experienced at each hop. The second scenario extends the number of hops to four, and also considers the same PDR per hop ( $PDR_{AB}=PDR_{BC}=PDR_{CD}=PDR_{DE}$ ). The second scenario has been implemented to investigate the effect of the number hops between source and destination on the performance of the link scheduling schemes. It is important noting that four hops have been selected between source and destination since this is the maximum number of hops recommended by the HART Communication Foundation for a multi-hop industrial wireless link. The third scenario is used to evaluate the performance of the link scheduling schemes using simulations that represent the link level fluctuations experienced in industrial wireless communications. Such fluctuations are reproduced using an empirically derived radio propagation model for industrial environments. Two distances between nodes (50 and 150 meters) have been simulated to account for different average link quality levels. The performance of the different schemes has then been evaluated for all possible eight combinations of distances between nodes for the 3-hop scenario depicted in Figure 5-3. The fourth

scenario considers a mobile node A that moves within the radio coverage of node B<sup>17</sup> following the random waypoint mobility model [54]. This scenario considers that node A always uses node B to transmit messages to the destination node D. In this case, it is not necessary to reprogram the assignment of links as a result of the mobility of node A. In this fourth scenario, the maximum distance between nodes A and B ( $d_{AB}$ ) is set equal to 150 meters. Two values (50m and 150m) have also been considered for the distance between static nodes. The fourth scenario has been implemented to evaluate the link scheduling schemes under variable link quality conditions resulting from the mobility of a node.

For the simulations, all functions that intervene in the link scheduling process have been implemented in Matlab. In particular, the implemented simulation platform includes a radio propagation model for industrial wireless communications, the data link layer, the nodes' mobility and the different link scheduling schemes evaluated. This study assumes that all nodes have been informed by the *Network Manager* of the route they should use to transmit their data to the destination node.

The schemes have been evaluated considering that the nodes integrate the XDM2510H WirelessHART radio transceiver [41]. The transceiver is powered with 3.6V, and has a power consumption of 18mA and 6mA when it is in transmission and reception mode, respectively. Its transmission power is 8dBm and its receiver sensibility is equal to -90dBm. The energy consumption is computed considering that nodes transmit messages of 133 Bytes, and that the correct or incorrect reception of a message in each hop is acknowledged with a message of 26 Bytes.

Radio propagation conditions in scenarios 3 and 4 have been simulated using the model presented in [26] for industrial environments. The model considers one-slope path-loss, and models the fading effects at 2.4GHz. Some of the model parameters are:  $d_0=15m$  (reference distance),  $PL(d_0)=71.84dBm$  (path-loss at  $d_0$  distance),  $n=2.16$  (path-loss exponent),  $\sigma=8.13dBm$  (shadowing standard deviation) and  $Gt=Gr=0dB$  (transmitter and receiver antenna gains). In this study, it is considered that a message is correctly received if the RSSI is above -90dBm. It is important noting that, as required by WirelessHART, no packet collisions can occur with the four scheduling schemes under evaluation.

---

<sup>17</sup> This restriction aims to represent the fact that in factories, the mobility of nodes is generally limited to their working environment, e.g. workers usually move around the machinery they manipulate.

### 5.5.1 Validation of analytical expressions

The reliability and latency evaluation under scenarios 1 and 2 are conducted using the analytical expressions presented in Section 5.4. It is then important to validate these expressions by comparing the results obtained when using the analytical expressions of  $PDR_{E2E}$  and  $D_{E2E}$  and when estimating these metrics through simulations. Figure 5-4 depicts such comparison<sup>18</sup> when considering the first scenario represented in Figure 5-3 and  $R$  is set equal to 1, 2, 3 and 4, referred as LIKUID<sub>1</sub>, LIKUID<sub>2</sub>, LIKUID<sub>3</sub>, and LIKUID<sub>4</sub> respectively). The figure shows for all schemes a close match between the results obtained using the analytical expressions (*Ana*) and using simulations (*Sim*). These results validate the derived analytical expressions.

### 5.5.2 Scenario 1

Figure 5-4a depicts the probability that a message is correctly received by the destination node ( $PDR_{E2E}$ ) as a function of the PDR experienced at each hop ( $PDR_i$ ). These results have been obtained for the first evaluation scenario (Figure 5-3) that considers a path or multi-hop route with  $H=3$  and  $PDR_{AB}=PDR_{BC}=PDR_{CD}$ . Results for LIKUID are shown for  $R=1$  (LIKUID<sub>1</sub>),  $R=2$  (LIKUID<sub>2</sub>) and  $R=3$  (LIKUID<sub>3</sub>). It is important remembering that the configuration with  $R=3$  corresponds to the case in which LIKUID utilizes the same total number of links as HbH and RTE in scenario 1 (Table 5-1). For a path with 3 hops, this total number of links is equal to six (Figure 5-2), which is also the minimum number of links necessary for HbH and RTE to allow for possible retransmissions at every hop of the path. LIKUID can allow retransmissions at any hop of the path using a lower total number of links for the complete path. Figure 5-2 showed that, for example, when LIKUID is configured with  $R=1$ , the total number of links assigned for the path or multi-hop route is equal to four (Table 5-1). In this case, only one retransmission is allowed for the complete path, but such retransmission can take place at any hop of the path. The results depicted in Figure 5-4a show that LIKUID<sub>2</sub> and LIKUID<sub>3</sub> outperform the other schemes for all possible values of  $PDR_i$ . This means that LIKUID can achieve higher  $PDR_{E2E}$  than HbH and RTE even if it assigns one link less (i.e.  $R=2$ ) for the complete path (Table 5-1). The obtained results also show that decreasing  $PDR_i$  values have a smaller effect on LIKUID than on the other schemes. For example, when  $PDR_i$  is equal to 0.95, LIKUID<sub>3</sub> achieves a  $PDR_{E2E}$  equal to 0.9999, and HbH and RTE a  $PDR_{E2E}$  equal to 0.9925 and 0.9860 respectively. When the  $PDR_i$  decreases to 0.75, LIKUID<sub>3</sub> can maintain a high  $PDR_{E2E}$  (0.9624) while the  $PDR_{E2E}$  for HbH and RTE is significantly degraded to 0.8240 and 0.7383 respectively. Figure 5-4a also shows that HbH achieves a higher  $PDR_{E2E}$  than RTE. This is

<sup>18</sup> The results are obtained considering the same  $PDR_i$  value for each hop in the path.

the case because HbH allows for a possible retransmission at every hop of the path, while RTE only allows for one retransmission in the full path. LIKUID<sub>1</sub> also allows for only one retransmission in the complete path. However, it only assigns 4 links compared to the 6 links assigned by RTE (Table 5-1). The poor reliability performance achieved by NoRtx emphasizes the importance of retransmissions to ensure high  $PDR_{E2E}$  results.

Figure 5-4b represents the end-to-end delivery delay ( $D_{E2E}$ ) that is estimated as the average number of links elapsed between the transmission of a message by the source node and its reception at the destination node. It is important remembering that  $D_{E2E}$  is computed considering only the messages correctly received by the destination node. As a result, the delay results have to be discussed taking into account the  $PDR_{E2E}$  achieved by each scheme. Figure 5-4b shows that HbH experiences the higher delivery delay  $D_{E2E}$ . This is the case because HbH can only deliver the message to the destination node at  $l_5$  even if there are no transmission errors, whereas all the other schemes can do so at  $l_3$ . The minimum possible delay  $D_{E2E}$  is hence equal to 5 for HbH, and equal to 3 for all other schemes. NoRtx has a delay always equal to 3 since retransmissions are not allowed and only received messages at the destination node are taken into account when computing  $D_{E2E}$ . However, NoRtx exhibits a poor  $PDR_{E2E}$  performance (Figure 5-4a), in particular under low  $PDR_i$  values. As it would be expected, RTE reduces the delay compared to HbH. However, RTE increases the delay compared to all the configurations of the LIKUID proposal, including the one that utilizes the same total number of links as RTE (i.e. LIKUID<sub>3</sub>). Figure 5-4 shows that LIKUID<sub>1</sub> can significantly reduce the delay compared to RTE even if both schemes achieve the same reliability levels. LIKUID<sub>2</sub> and LIKUID<sub>3</sub> increase the ratio of messages delivered to the destination node compared to HbH and RTE, and they do so while reducing the time to deliver them. These results clearly demonstrate that using shared links and virtual tokens can reduce unnecessary waiting times at intermediate hops and increase the reliability at each hop of the path. Of particular relevance are the results obtained with LIKUID<sub>2</sub>. This configuration can increase the  $PDR_{E2E}$  and decrease the  $D_{E2E}$  (compared to HbH and RTE) while reducing the total number of links assigned to a complete path or multi-hop route (Table 5-1). The released link can be utilized for other purposes including augmenting the number of programmed paths or increasing their  $PDR_{E2E}$ .

Table 5-1. Number of total assigned links as a function of the number of hops in the path.

$H$	LIKUID <sub>4</sub>	LIKUID <sub>3</sub>	LIKUID <sub>2</sub>	LIKUID <sub>1</sub>	HbH	RTE	NoRtx
3	-	6	5	4	6	6	3
4	8	7	6	5	8	8	4

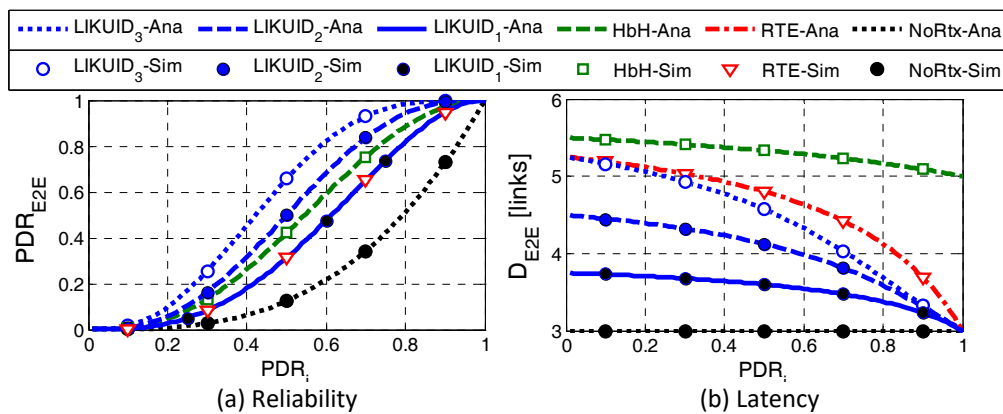


Figure 5-4. Reliability and latency as a function of the  $PDR_i$  for scenario 1.

Figure 5-5a represents the average percentage of links that have been utilized for the transmission of a message as a function of the  $PDR_i$ . The depicted results show that LIKUID always operates more efficiently than HbH and RTE as it achieves a higher average utilization of the assigned links for all the evaluated  $PDR_i$  values. A joint analysis of the results in Figure 5-4 and Figure 5-5 reveals some interesting findings. Existing schemes (HbH, RTE and NoRtx) exhibit a low utilization of links (around 33%) when operating under low  $PDR_i$  values (between 0 and 0.2). Such utilization level indicates that few messages are delivered to the destination node, and few actually even reach the second hop of the path. LIKUID increases significantly the utilization level under low  $PDR_i$  values (Figure 5-5a), but this does not have a significant impact on the  $PDR_{E2E}$  (Figure 5-4a). Figure 5-5a also shows that LIKUID can increase the average percentage of links that have been utilized under high  $PDR_i$  values (between 0.9 and 1) when using a smaller total number of links for the complete path (i.e. LIKUID<sub>1</sub> has higher utilization level than LIKUID<sub>2</sub> and LIKUID<sub>3</sub>). This is the case because under good radio link quality conditions, messages do not generally require retransmissions to reach the destination node. The links reserved for such retransmissions are therefore rarely utilized.

Figure 5-5b depicts the number of Unnecessary Reception Attempts (URA) for each message successfully delivered to the destination as a function of the  $PDR_i$ . Previous results have clearly demonstrated the significant reliability and latency benefits of LIKUID. However, such benefits come at the expense of increasing the URA under low  $PDR_i$  values, and in particular when utilizing the same total number of links as HbH, RTE or NoRtx (i.e. LIKUID<sub>3</sub>). A higher number of retransmissions take place in the first hops of the path when experiencing low  $PDR_i$  values. In this case, nodes close to the destination node will unnecessarily be in reception mode for a larger number of links. This drawback is mitigated as the  $PDR_i$  augments and URA decreases. Also, the URA can be decreased

for LIKUID by reducing the total number of links assigned to a complete path or multi-hop route. For example, LIKUID<sub>2</sub> experiences the same URA levels as HbH while increasing  $PDR_{E2E}$  and reducing  $D_{E2E}$ .

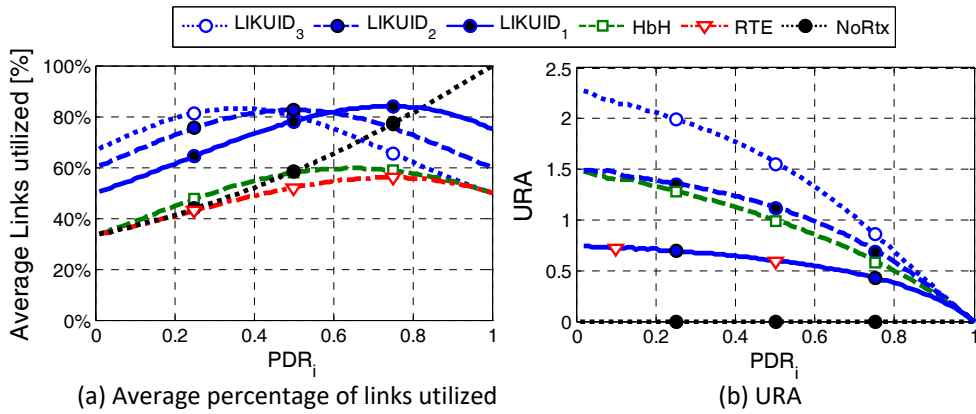


Figure 5-5. Average percentage of links that have been utilized and Unnecessary Reception Attempts (URA) as a function of the  $PDR_i$  for scenario 1.

The total energy consumption ( $E$ ) is shown in Figure 5-6a as a function of the  $PDR_i$ . The total energy consumption varies with the  $PDR_i$ , but all algorithms converge to the same energy consumption value (approximately 1180  $\mu$ J) when the  $PDR_i$  is equal to 1. Significant differences are observed under low  $PDR_i$  values. In particular, Figure 5-6a shows that LIKUID<sub>3</sub> increases the energy consumption. However, LIKUID<sub>3</sub> is the scheme achieving the highest  $PDR_{E2E}$  levels (Figure 5-4a), and reliability is the most critical aspect in industrial applications. The high energy consumption levels characterizing LIKUID are due to two main factors. The first one is the fact that LIKUID achieves the highest  $PDR_{E2E}$ . The higher the packet delivery ratio, the more messages are transmitted, and therefore more energy is consumed for their transmission. The second factor is related to the higher URA values measured with LIKUID (Figure 5-5b), and that result from the fact that intermediate nodes must be in reception mode in case a message is sent to them (virtual token concept). Although this has a cost in terms of URA and energy consumption, it provides LIKUID with higher flexibility. Such flexibility is at the origin of the reliability and latency gains achieved by LIKUID with respect to existing schemes. Since the different scheduling schemes result in varying  $PDR_{E2E}$  levels, a more fair comparison of the energy performance is possible considering the average energy consumed per message correctly received at the destination node ( $E_{PMD}$ ). Figure 5-6b represents the  $E_{PMD}$  as a function of  $PDR_i$ . As it could be expected, the higher the  $PDR_i$ , the lower the  $E_{PMD}$  metric since fewer retransmissions are needed. For high  $PDR_i$  values, few differences between the schemes can be observed. The differences appear when

operating under low  $PDR_i$  values. In this case, LIKUID<sub>3</sub> results in the lowest  $E_{PMD}$  values. This result demonstrates that although LIKUID<sub>3</sub> increases the total energy consumption as a result of its higher  $PDR_{E2E}$ , it is more efficient than existing schemes.

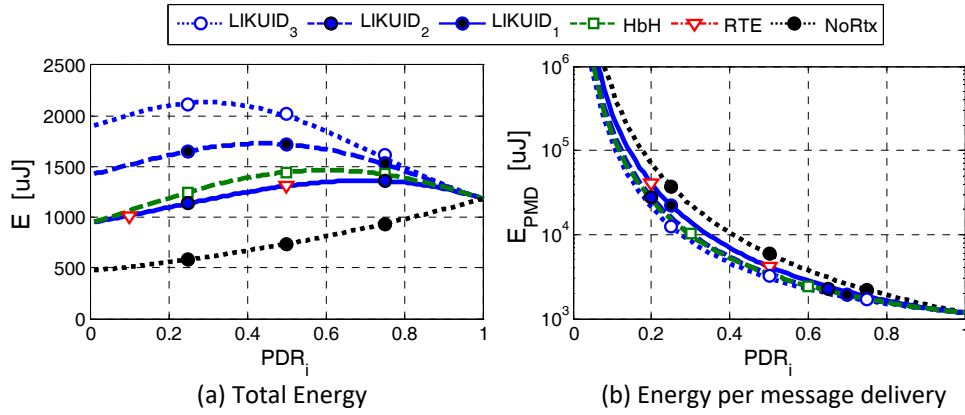


Figure 5-6. Total energy consumption and average energy consumed per message correctly received at the destination node as a function of the  $PDR_i$  for scenario 1.

Finally, Table 5-2 presents for the first evaluation scenario the number of blocked links defined as the number of links during which a node has to be in transmission or reception mode for each message that is transmitted from source to destination. The number of links during which a node is blocked only depends on the number of hops  $H$ . In this case, the results depicted in Table 5-2 are valid for the first, third and fourth evaluation scenarios since all of them are characterized by  $H=3$ . LIKUID<sub>3</sub> has the highest number of blocked links. LIKUID<sub>2</sub> only results in one more blocked link at the source and destination nodes compared to HbH and RTE. LIKUID<sub>1</sub> reduces the number of blocked links compared to HbH and RTE (Table 5-2) and the total number of links assigned to the complete path or multi-hop route (Table 5-1). It is important noting that LIKUID<sub>1</sub> improved the  $D_{E2E}$  performance compared to RTE (Figure 5-4), and achieved the same  $PDR_{E2E}$  as HbH and RTE while reducing the total number of links assigned to the complete path (Table 5-1).

Table 5-2. Blocked links ( $H=3$ ).

Node	LIKUID <sub>3</sub>	LIKUID <sub>2</sub>	LIKUID <sub>1</sub>	HbH	RTE	NoRtx
A	4	3	2	2	2	1
B	5	4	3	4	4	2
C	5	4	3	4	4	2
D	4	3	2	2	2	1



### 5.5.3 Scenario 2

The results in Figure 5-7a confirm that LIKUID outperforms HbH and RTE when there are at least two shared links for retransmissions and  $H$  is equal or smaller than 4 (i.e. LIKUID<sub>2</sub>, LIKUID<sub>3</sub> and LIKUID<sub>4</sub> when  $H=4$ )<sup>19</sup>. It is also important noting that the  $PDR_{E2E}$  gains achieved with LIKUID with respect to the other schemes increase with the number of hops. For example, when  $PDR_i$  is equal to 0.95, LIKUID<sub>3</sub> achieves a  $PDR_{E2E}$  of 0.9998 under scenario 2 (similar performance to that achieved under scenario 1 when the  $PDR_{E2E}$  was equal to 0.9999). On the other hand, HbH and RTE see their  $PDR_{E2E}$  performance reduce to 0.9885 and 0.9765 in scenario 2 compared to 0.9925 and 0.9860 respectively under scenario 1. It is also relevant noting that LIKUID<sub>4</sub> increases the  $PDR_{E2E}$  to 0.99998. In comparison, LIKUID<sub>3</sub> achieved a  $PDR_{E2E}$  equal to 0.9999 in scenario 1<sup>20</sup>. Figure 5-7b shows that similar  $D_{E2E}$  performance trends to those observed under scenario 1 (Figure 5-4b) are again experienced under scenario 2, with LIKUID outperforming again HbH and RTE. The delay increases with the number of hops for all link scheduling schemes. However, LIKUID experiences a smaller increase compared to the other schemes. Figure 5-7a and Figure 5-7b show that even when the total number of links assigned to the path is reduced to 6 (HbH and RTE require 8 links when  $H=4$ ), LIKUID<sub>2</sub> still outperforms HbH and RTE both in terms of reliability and latency.

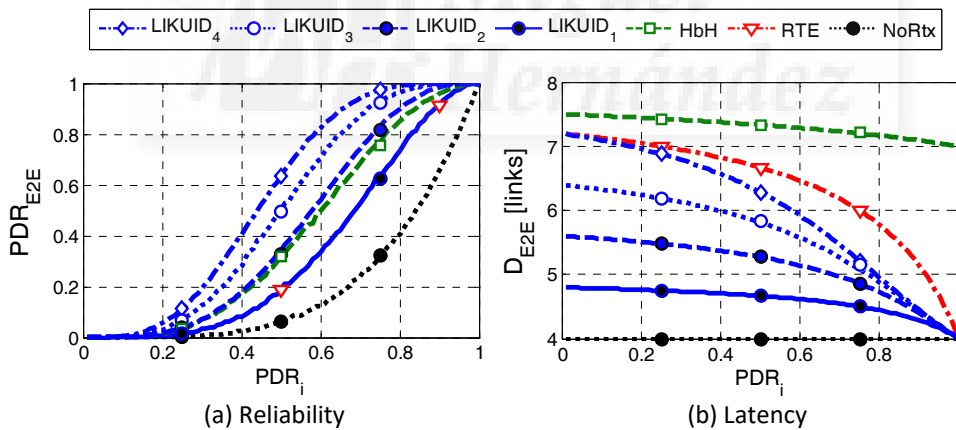


Figure 5-7. Reliability and latency as a function of the  $PDR_i$  for scenario 2.

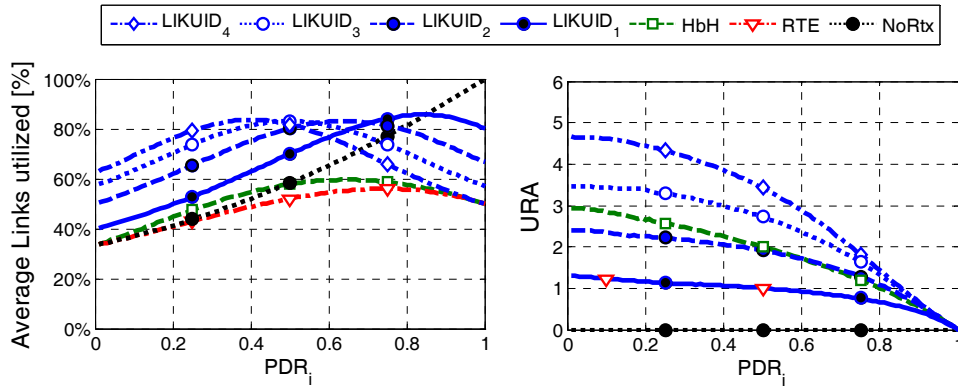
Few differences with respect to scenario 1 were found when comparing the efficiency of the link scheduling schemes under scenario 2 (Figure 5-8). Figure 5-8 shows

<sup>19</sup> In fact, LIKUID always outperforms RTE independently of the number of hops in a path when  $R$  is equal or higher than 2.

<sup>20</sup> LIKUID<sub>4</sub> assigns the same total number of links for the path as HbH and RTE in scenario 2. LIKUID<sub>3</sub> assigned the same total number of links for the path as HbH and RTE in scenario 1.

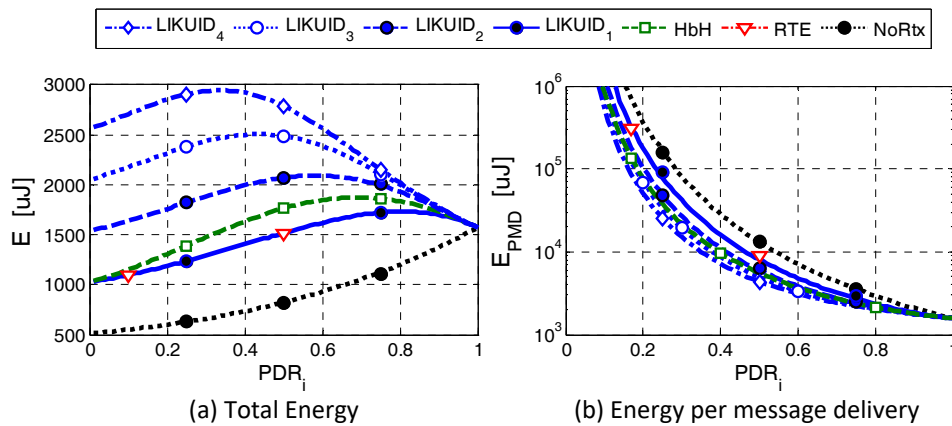


that LIKUID increases the average percentage of links that have been utilized under scenario 2 compared to scenario 1. This is the case because there are more shared links for retransmissions. The URA metric also increases under scenario 2 since more nodes participate in the transmission of the message.



(a) Average percentage of links that have been utilized (b) URA  
 Figure 5-8. Average percentage of links that have been utilized and Unnecessary Reception Attempts (URA) as a function of the  $PDR_i$  for scenario 2.

The comparison of Figure 5-9 and Figure 5-6 shows that the energy consumption increases with the number of hops. Similar conclusions in terms of energy consumption and efficiency can be reached when comparing the different link scheduling schemes under scenario 2. LIKUID offers the possibility to flexibly utilize the shared links for retransmissions. This has a cost in terms of URA and total energy consumption under low link quality levels. Such cost increases with the number of hops. However, a close look to the energy efficiency ( $E_{PMD}$ ) shows that even if the number of hops increases, LIKUID is still more efficient when evaluating the energy per message correctly received at the destination node. In fact, LIKUID<sub>4</sub> and LIKUID<sub>3</sub> achieve the lowest  $E_{PMD}$  levels.



(a) Total Energy (b) Energy per message delivery  
 Figure 5-9. Total energy consumption and average energy consumed per message correctly received at the destination node as a function of the  $PDR_i$  for scenario 2.

Table 5-2 and Table 5-3 show that increasing the number of hops does not have an impact on the number of blocked links per node. The only notable effects are: 1) more intermediate nodes benefit with LIKUID from the reduction in the number of blocked links compared to HbH and RTE when  $R$  decreases, and 2) increasing the number of possible retransmissions using shared links (i.e. increasing  $R$  from 3 to 4) increases the number of blocked links for all nodes in the path. Such increase helps though augment the  $PDR_{E2E}$  and reduce the  $D_{E2E}$  with respect to HbH and RTE.

 Table 5-3. Blocked links ( $H=4$ ).

Node	LIKUID <sub>4</sub>	LIKUID <sub>3</sub>	LIKUID <sub>2</sub>	LIKUID <sub>1</sub>	HbH	RTE	NoRtx
A	5	4	3	2	2	2	1
B	6	5	4	3	4	4	2
C	6	5	4	3	4	4	2
D	6	5	4	3	4	4	2
E	5	4	3	2	2	2	1

#### 5.5.4 Scenario 3

Scenarios 1 and 2 assumed that all hops experience the same  $PDR_i$ . The third scenario simulates a more realistic scenario with variable  $PDR_i$  per hop. The  $PDR_i$  conditions have been simulated using the radio propagation model described in [26] and considering that nodes can be separated by 50 or 150m. With the simulation conditions reported in Section 5.5, a distance between nodes of 50m results in an average PDR equal to 0.953. The average PDR decreases to 0.711 when the distance between nodes increases to 150m. All possible configurations of distance between hops (eight) have been simulated and evaluated for a path with  $H=3$ . The configurations are referenced with the possible combinations of values for  $[d_{AB}, d_{BC}, d_{CD}]$ .  $d_{AB}$ ,  $d_{BC}$  and  $d_{CD}$  represent the distance between nodes A and B, B and C, and C and D respectively.

Table 5-4 shows the  $PDR_{E2E}$  obtained for the different schemes and all possible configurations of distance between hops. First of all, it is important highlighting that Table 5-4 confirms the trends observed under scenarios 1 and 2. Under realistic simulation conditions, LIKUID improves again the reliability compared to existing schemes (HbH and RTE). The results also show that when the path includes at least one long distance hop, LIKUID<sub>3</sub> achieves a  $PDR_{E2E}$  notably higher than the other schemes. LIKUID<sub>2</sub> experiences a slight degradation with respect to LIKUID<sub>3</sub>, but still significantly outperforms HbH and RTE. LIKUID is more robust because it can utilize more links for the long distance hops that experience lower PDR levels. On the other hand, HbH and RTE

can only utilize a maximum of two links per hop independently of their link quality. It is also relevant noting that the achieved  $PDR_{E2E}$  depends on the number of long distance hops in the path, but not on their position in the path.

Table 5-4.  $PDR_{E2E}$  in scenario 3.

$[d_{AB}, d_{BC}, d_{CD}]$	LIKUID <sub>3</sub>	LIKUID <sub>2</sub>	HbH	RTE	NoRtx
[50, 50, 50]	0.999	0.999	0.997	0.993	0.902
[50, 50, 150]	0.992	0.972	0.915	0.902	0.665
[50, 150, 50]	0.992	0.972	0.916	0.901	0.665
[150, 50, 50]	0.992	0.971	0.915	0.901	0.665
[150, 150, 50]	0.972	0.921	0.841	0.789	0.491
[150, 50, 150]	0.972	0.921	0.840	0.789	0.491
[50, 150, 150]	0.972	0.921	0.840	0.789	0.491
[150, 150, 150]	0.939	0.853	0.772	0.674	0.362

The results depicted in Table 5-5 also confirm the superior  $D_{E2E}$  performance of LIKUID under realistic simulation conditions. It is interesting to note that the  $D_{E2E}$  achieved with LIKUID<sub>3</sub>, LIKUID<sub>2</sub> and RTE depends on the number of long distance hops in the path (the fewer the number of long distance hops, the smaller the delay). This is the case because each retransmission augments  $D_{E2E}$  for these three schemes independently of the hop for which the retransmission was necessary. On the other hand, the delay performance of HbH does not depend on the number of long distance hops in the path, but mainly on the link quality of the last hop in the path. In fact, only the retransmissions on the last hop of the path increase the  $D_{E2E}$  metric for HbH.

Table 5-5.  $D_{E2E}$  [links] in scenario 3.

$[d_{AB}, d_{BC}, d_{CD}]$	LIKUID <sub>3</sub>	LIKUID <sub>2</sub>	HbH	RTE	NoRtx
[50, 50, 50]	3.10	3.10	5.03	3.28	3.00
[50, 50, 150]	3.44	3.39	5.22	3.79	3.00
[50, 150, 50]	3.44	3.39	5.03	3.79	3.00
[150, 50, 50]	3.44	3.39	5.03	3.79	3.00
[150, 150, 50]	3.74	3.61	5.03	4.14	3.00
[150, 50, 150]	3.74	3.61	5.22	4.13	3.00
[50, 150, 150]	3.74	3.61	5.22	4.14	3.00
[150, 150, 150]	3.99	3.79	5.22	4.39	3.00

Table 5-6 reports the average percentage of links that have been utilized (out of all the assigned links for the path) under scenario 3. It can be seen that LIKUID<sub>3</sub> utilizes the links similarly to HbH and RTE when there are no long distance hops in the path. When the number of such hops increases, LIKUID<sub>3</sub> augments the utilization of assigned links with respect to HbH and RTE. This means that when the link quality degrades, LIKUID<sub>3</sub> utilizes more the available links to conduct retransmissions, which ultimately benefits its  $PDR_{E2E}$  performance as previously highlighted. The results in Table 5-6 show that it is actually LIKUID<sub>2</sub> the scheme that results in a higher utilization of the assigned links (10% more than LIKUID<sub>3</sub>). This is due to the fact that LIKUID<sub>2</sub> has one link less assigned to the complete path compared to LIKUID<sub>3</sub>. In this case, LIKUID<sub>2</sub> needs to do a more intense utilization of the available links to conduct retransmissions when the link quality conditions degrade. However, its capacity to efficiently combat poor link quality conditions decreases with respect to LIKUID<sub>3</sub> as the number of long distance hops in the path increases.

Table 5-6. Average percentage of links that have been utilized in scenario 3.

$[d_{AB}, d_{BC}, d_{CD}]$	LIKUID <sub>3</sub>	LIKUID <sub>2</sub>	HbH	RTE	NoRtx
[50, 50, 50]	51.7%	62.1%	51.6%	51.6%	96.7%
[50, 50, 150]	57.7%	68.7%	55.9%	55.5%	96.7%
[50, 150, 50]	57.6%	68.1%	54.5%	54.1%	88.5%
[150, 50, 50]	57.5%	67.7%	53.1%	52.7%	80.0%
[150, 150, 50]	62.8%	72.4%	55.7%	53.8%	74.0%
[150, 50, 150]	63.1%	73.4%	56.9%	55.6%	80.1%
[50, 150, 150]	63.2%	73.9%	58.3%	57.0%	88.5%
[150, 150, 150]	68.0%	77.3%	59.2%	55.9%	74.0%

The results depicted in Table 5-7 show that LIKUID<sub>3</sub> results again in the larger URA. However, the impact of LIKUID on the URA reduces when  $R$  decreases (i.e. LIKUID<sub>2</sub>). Table 5-7 also shows that URA increases when the long distance hops are located in the first hops of the path. In this case, retransmissions are usually necessary to progress with the transmission of the message towards the destination node. The nodes that are closer to the destination will be unnecessarily in reception mode until such retransmissions are successful. LIKUID increases the utilization of links under scenario 3 in order to accommodate the necessary retransmissions that benefit the final  $PDR_{E2E}$ .

Table 5-7. URA metric in scenario 3.

$[d_{AB}, d_{BC}, d_{CD}]$	LIKUID <sub>3</sub>	LIKUID <sub>2</sub>	HbH	RTE	NoRtx
[50, 50, 50]	0.10	0.10	0.10	0.09	0
[50, 50, 150]	0.10	0.10	0.10	0.07	0
[50, 150, 50]	0.44	0.39	0.29	0.26	0
[150, 50, 50]	0.78	0.68	0.48	0.45	0
[150, 150, 50]	1.05	0.87	0.67	0.54	0
[150, 50, 150]	0.73	0.61	0.48	0.38	0
[50, 150, 150]	0.42	0.35	0.29	0.22	0
[150, 150, 150]	0.99	0.79	0.67	0.46	0

Despite the additional retransmissions, Table 5-8 shows that LIKUID does not increase the average energy per message correctly received at the destination node ( $E_{PMD}$ ). In fact, LIKUID can even slightly decrease  $E_{PMD}$  compared to existing schemes. Table 5-8 also shows that the reduction in  $E_{PMD}$  achieved with LIKUID compared with the other schemes is higher as the number of long distance hops in the path increases. This is the case because LIKUID increases the number of messages delivered to the destination node, and therefore decreases the energy consumed per delivered message.

 Table 5-8.  $E_{PMD}$  [ $\mu$ J] in scenario 3.

$[d_{AB}, d_{BC}, d_{CD}]$	LIKUID <sub>3</sub>	LIKUID <sub>2</sub>	HbH	RTE	NoRtx
[50, 50, 50]	1225	1225	1226	1229	1268
[50, 50, 150]	1377	1394	1444	1457	1721
[50, 150, 50]	1388	1398	1422	1434	1590
[150, 50, 50]	1400	1403	1401	1413	1455
[150, 150, 50]	1572	1597	1613	1661	1843
[150, 50, 150]	1566	1603	1634	1700	1972
[50, 150, 150]	1554	1598	1658	1725	2154
[150, 150, 150]	1758	1835	1865	2021	2497

### 5.5.5 Scenario 4

The fourth scenario extends the third scenario and considers that the first node in the path (node A) is a mobile node. In the simulated scenario, node A moves around the coverage area of node B at a speed of 1 m/s and following the *random waypoint* mobility model [54]. The maximum distance between nodes A and B has been set to 150m. The fourth scenario also considers variable  $PDR_i$  levels at each hop, and distances of 50 or 150m between nodes B and C, and between nodes C and D.

Figure 5-10 represents the results obtained for all the metrics under scenario 4. The figure depicts the average values and the 5<sup>th</sup> and 95<sup>th</sup> percentiles. Figure 5-10 demonstrates that the proposed link scheduling scheme outperforms existing solutions even under the presence of mobile nodes. The configuration of LIKUID with  $R$  equal to 3 (LIKUID<sub>3</sub>) achieves the highest  $PDR_{E2E}$  (Figure 5-10a) and the smallest  $D_{E2E}$  (Figure 5-10b). LIKUID<sub>3</sub> also augments the average utilization of the available links compared to HbH and RTE (Figure 5-10c), but increases the URA (Figure 5-10d). As it was previously the case, such higher URA is the cost incurred by the scheduling flexibility embedded in LIKUID and that is at the origin of its higher reliability and latency performance. However, LIKUID<sub>3</sub> is again the most efficient scheme for delivering messages to the destination node and results in the lower  $E_{PMD}$  value (Figure 5-10e). Similar trends to that reported for scenario 3 are also observed under scenario 4 with a mobile node. In particular, the gains achieved by LIKUID with respect to existing schemes augment when the link quality conditions ( $PDR_i$ ) decrease. For example, LIKUID<sub>3</sub> improves the  $PDR_{E2E}$  with respect to HbH by 2% under the configuration [50, 50]. The improvement increases to 14% under the configuration [150, 150]. LIKUID also experiences a smaller  $PDR_{E2E}$  reduction when the link quality conditions degrade compared to existing schemes. For example, the  $PDR_{E2E}$  performance of LIKUID<sub>3</sub> only decreases by 3.4% when comparing the best ([50, 50] configuration) and worst ([150, 150] configuration) link quality conditions. On the other hand, the  $PDR_{E2E}$  performance of HbH and RTE decreases by 15.4% and 21.4% respectively under the same conditions. The capacity exhibited by LIKUID to combat poor link quality conditions is highly relevant for critical applications, such as the industrial ones, that demand very high reliability levels. The results also show that LIKUID is capable to guarantee high  $PDR_{E2E}$  levels to mobile nodes. So as long as the mobile nodes do not leave the communications range of their connecting nodes, LIKUID does not need to reschedule the links since it can maintain high  $PDR_{E2E}$  levels.

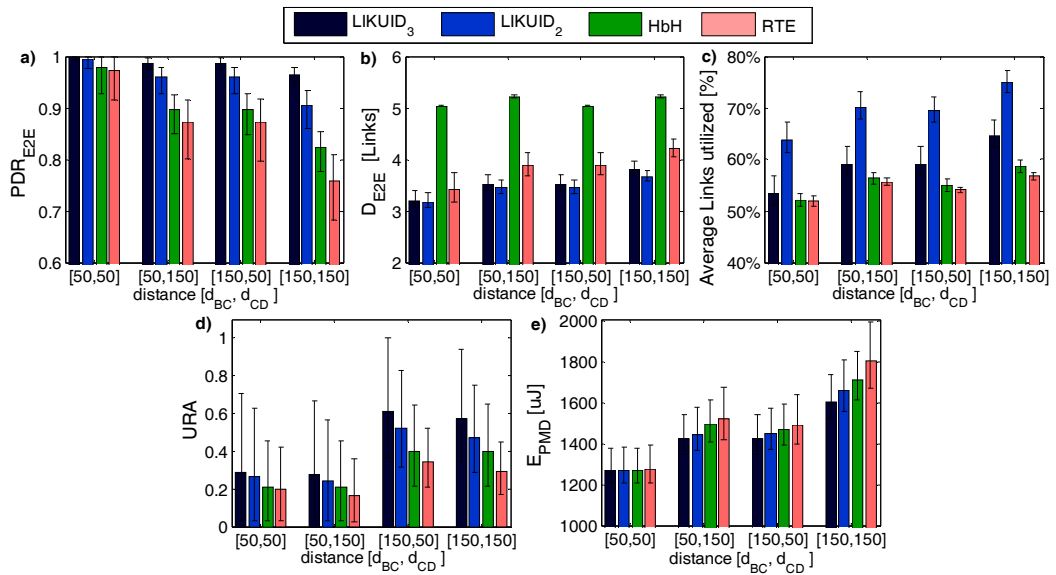


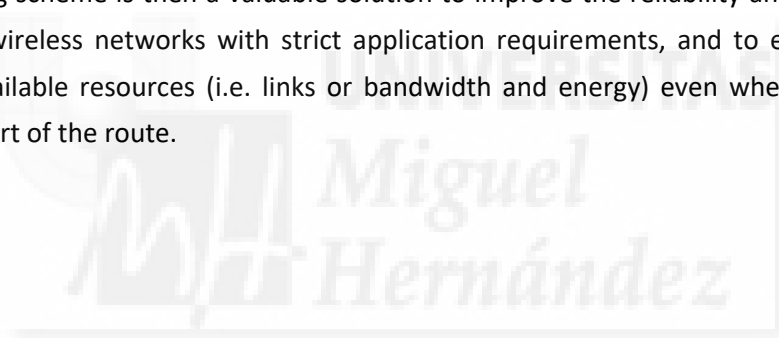
Figure 5-10. Results (average, 5th and 95th percentiles) obtained under scenario 4.

## 5.6 Conclusions

This chapter has presented and evaluated LIKUID, a novel link scheduling scheme for industrial wireless networks. The proposed scheme proposes the use of shared links between nodes that are part of a given path or multi-hop route. The messages transmitted over the route act as virtual tokens to identify which node should utilize the shared links at each point in time. The use of shared links and virtual tokens allows for a more flexible use of the available links that can take into account the link quality conditions and the need for retransmissions even when mobile devices are considered. The proposed link scheduling scheme is here applied to industrial wireless networks, but it is important emphasizing that it can be used in other centralized TDMA-based multi-hop wireless networks.

The proposed link scheduling scheme has been thoroughly evaluated and its performance has been compared against two existing schemes. To this aim, this chapter has presented analytical expressions of the reliability ( $PDR_{E2E}$ ) and latency ( $D_{E2E}$ ) performance that can be used for a first performance estimate. The evaluation has been extended using numerical evaluations and simulations under different scenarios and operating conditions. The obtained results clearly demonstrate that the proposed link scheduling scheme significantly improves the reliability and end-to-end delay of the existing schemes when utilizing the same total number of links assigned to a path or multi-hop route. This trend has been shown to be independent of the number of hops in

the route, the link quality conditions per hop, and the presence of mobile nodes in the route. The proposed scheme also efficiently utilizes the available resources. In particular, it increases the utilization of the assigned links and reduces the energy consumed per message correctly delivered to the destination node. All these benefits are obtained at the cost of increasing the number of blocked links and the time a node is unnecessarily in reception mode in case it should receive a message. These drawbacks can be deemed relatively minor considering the reliability and latency gains achieved with the proposed link scheduling scheme. In any case, they can be reduced by decreasing the number of shared links used for retransmissions ( $R$ ). Decreasing  $R$  also reduces the total number of links assigned for a given path or multi-hop route, but it has also an impact on the reliability. The study has also shown that it is possible to maintain the reliability levels offered by existing schemes such as HbH or RTE while reducing the total number of links assigned to a route. In this case, the proposed scheme can free valuable resources that can be used for other functions in the network. The proposed link scheduling scheme is then a valuable solution to improve the reliability and latency in industrial wireless networks with strict application requirements, and to efficiently utilize the available resources (i.e. links or bandwidth and energy) even when mobile devices are part of the route.





# 6

## **Selección de rutas y asignación coordinada de enlaces de comunicación**

La fiabilidad y el retardo de las comunicaciones *end-to-end* en una red mallada multi-salto como la definida en WirelessHART dependen en gran medida de cómo se seleccionan los dispositivos intermedios que retransmitirán la información, y de cómo se asignan los enlaces de comunicación. Esto es especialmente relevante en presencia de dispositivos móviles debido a que el nivel de fiabilidad es variable y por tanto se pueden ocasionar continuas reasignaciones de rutas y enlaces de comunicación cuando se requiere garantizar una fiabilidad por encima de una fiabilidad objetivo. Mientras que el capítulo anterior se centraba en la asignación de enlaces de comunicación en una ruta pre-establecida, este capítulo aborda de forma conjunta la selección de rutas y la asignación de enlaces de comunicación. El objetivo global es el de reducir el número de reasignaciones necesarias en presencia de dispositivos móviles garantizando el nivel de fiabilidad *end-to-end* objetivo marcado por las aplicaciones industriales.

El apartado 6.1 introduce el estado del arte de los trabajos existentes en la literatura relacionados con la selección de rutas y la asignación de enlaces de comunicación, prestando atención especial a aquellos en los que se considera dispositivos móviles. El estudio que aquí se presenta considera un escenario en el que el dispositivo móvil es origen de la información, y es necesario establecer una o varias rutas entre dicho dispositivo y el *Gateway* para la transmisión de datos. Dichas rutas incluyen un salto desde el dispositivo móvil hasta uno de los dispositivos estáticos desplegados. El estudio se centra en ese primer salto ya que se considera que la transmisión desde el dispositivo estático retransmisor hasta el *Gateway* se realiza a través de otros dispositivos estáticos, y por lo tanto su calidad o PDR es más fácilmente controlable a través de un despliegue adecuado de los dispositivos comparado con el caso del primer salto desde el dispositivo móvil. En este contexto, el apartado 6.2 analiza el impacto de la selección del primer salto desde el dispositivo móvil a un dispositivo estático sobre la fiabilidad *end-to-end*. En concreto, se estudia el impacto de dicha selección sobre el área en la cual es posible garantizar una fiabilidad *end-to-end* superior a la fiabilidad objetivo predefinida. Cuanto mayor sea dicho área, menor número de reconfiguras de rutas y enlaces de comunicación serán necesarias a medida que el dispositivo móvil se desplace en el escenario bajo evaluación. Los resultados obtenidos han sido utilizados en el apartado 6.3 para proponer, evaluar y comparar tres técnicas para la reasignación de enlaces de comunicación y rutas en presencia de dispositivos móviles cuando se requiere garantizar la fiabilidad *end-to-end* objetivo marcada por las aplicaciones. Las técnicas propuestas explotan (1) la posibilidad de modificar los enlaces de comunicación asignados a cada salto dentro una ruta multi-salto, y (2) la diversidad espacial que permiten los grafos que define WirelessHART.

## 6.1 Estado del arte

Hasta la fecha se han realizado una importante cantidad de trabajos relacionados con el enrutamiento (*routing*) y con la asignación de enlaces de comunicación (*scheduling*) en redes inalámbricas de sensores en general [55][56], y en redes inalámbricas industriales en particular [57].

En materia de asignación de enlaces de comunicación, [58] propone la aplicación de políticas FSRF (*Fastest Sample Rate First*) para la asignación de enlaces de comunicación. En concreto, [58] se centra en la identificación de qué dispositivos han de escogerse para mejorar la fiabilidad del enrutamiento, tratando además de utilizar el máximo número de canales de comunicación. [58] busca también reducir el número de enlaces

de comunicación necesarios para el intercambio de datos, y para ello propone el uso de enlaces de comunicación compartidos<sup>21</sup> para las transmisiones de las rutas redundantes. Otro trabajo relacionado es el presentado en [51], donde los autores presentan las siguientes contribuciones para la asignación de enlaces de comunicación en redes WirelessHART: (1) demostración de que el problema de la asignación de enlaces de comunicación de un conjunto de flujos de datos periódicos con *deadlines* de transmisión es de complejidad NP-completo; (2) propuesta de un algoritmo de asignación de enlaces de comunicación basado en *Branch-and-Bound* (B&B) que utiliza un árbol de búsqueda donde cada dispositivo corresponde a una asignación parcial que puede o no llevar a una asignación de enlaces de comunicación factible; y (3) propuesta de un eficiente y práctico algoritmo heurístico denominado C-LLF (*Conflict-aware Least Laxity First*) que tiene en cuenta los posibles conflictos en la asignación de enlaces en las redes WirelessHART. El trabajo presentado en [27] propone una técnica de asignación de enlaces de comunicación en los distintos saltos de una ruta con la intención de satisfacer las condiciones establecidas en WirelessHART relacionadas con la asignación de enlaces de comunicación presentadas en el apartado 2.5. Entre estas condiciones se encuentran: ningún dispositivo ha de ser programado para escuchar dos canales diferentes en un mismo *slot*; en rutas de múltiples saltos, cada salto ha de estar asignado de forma previa al siguiente salto; una transmisión y un primer reintento en una ruta y un segundo reintento en una segunda ruta han de ser asignados por redundancia. Esta técnica, denominada HbH (*Hop by Hop*), fue utilizada en el capítulo 5 como técnica de asignación de enlaces de comunicación de referencia para comparar el rendimiento de LIKUID.

En materia de selección de rutas para la comunicación entre dos dispositivos, [59] propone una técnica para establecer rutas que incluyan al menos dos dispositivos como alternativa para la transmisión en cada salto de la ruta. Su objetivo es el de identificar rutas que mejoren la fiabilidad de las comunicaciones a la vez que se balancea el consumo de energía entre los distintos dispositivos de la red con el fin de prolongar la vida útil de la red. En esta misma línea, el trabajo presentado en [50] utiliza la técnica *Graph Coloring* para determinar las rutas que optimizan la latencia y proporcionan una alta fiabilidad. En [50] se considera que las posibles comunicaciones en la red pueden ser representadas por los enlaces de un grafo, y que los *slots* temporales asignados pueden ser representados con colores. Con estas condiciones, la asignación de las rutas establece como condición que no puede asignarse el mismo color (*slot* temporal) a dos enlaces adyacentes en el grafo.

---

<sup>21</sup> Un enlace de comunicación compartido es aquel que puede ser utilizado por más de un dispositivo para transmitir un paquete de datos.

Los anteriores trabajos no tienen en cuenta la presencia de dispositivos móviles a la hora de determinar las rutas y los enlaces de comunicación. De hecho, si la movilidad de un dispositivo supone el cambio de una ruta o de un enlace de comunicación, las propuestas de dichos trabajos requerirían obtener una nueva asignación de rutas y enlaces de comunicación que afectaría a todas las transmisiones de la red. En otros estudios donde sí se consideran dispositivos móviles, los enlaces de comunicación que se asignan para todas las comunicaciones en la red son preprogramados. Este es el caso de los estudios presentados en [60] y [61] en el marco del proyecto GINGSENG. Dichos estudios abordan la gestión de las rutas y los enlaces de comunicación estableciendo una topología de árbol predimensionada con una jerarquía lógica basada en la reserva de enlaces de comunicación preprogramados para los potenciales dispositivos móviles. Así, el dispositivo móvil se asocia a los distintos dispositivos estáticos desplegados y utiliza para sus transmisiones los enlaces de comunicación que durante el despliegue de la red le son asignados para comunicaciones desde/hacia dispositivos móviles.

Una posible forma de abordar la movilidad de los dispositivos es poder modificar de forma dinámica la ruta y enlaces de comunicación en base a la posición del dispositivo y su contexto de comunicaciones. Sin embargo, esta forma de abordar la movilidad de los dispositivos puede suponer un alto número de reasignaciones de rutas y enlaces de comunicación generados por la movilidad de los dispositivos. Por ello, en este capítulo se aborda de forma conjunta la selección de rutas y la asignación de enlaces de comunicación con el objetivo de reducir el número de reasignaciones necesarias en presencia de dispositivos móviles garantizando el nivel de fiabilidad *end-to-end* objetivo marcado por las aplicaciones. Si bien, esta asignación podría resultar no ser la que obtiene la máxima fiabilidad y el mínimo retardo en cada instante de tiempo, sí podría garantizar los niveles de fiabilidad y/o retardo requeridos reduciendo el número de reasignaciones generadas por la movilidad de los dispositivos. Es importante resaltar que la reducción del número de reasignaciones reduce la señalización y el *overhead*, y mejora la eficiencia y escalabilidad de la red.

## 6.2 Impacto de la selección de la ruta

Este estudio considera un escenario similar a los definidos para los capítulos anteriores, y en el cual hay un dispositivo móvil que es origen de la información y que debe conectarse a uno de los dispositivos estáticos desplegados en el escenario para enviar la información hasta el correspondiente *Gateway*. La selección del dispositivo estático al que debe conectarse el dispositivo móvil afecta de forma considerable a la

fiabilidad *end-to-end* de la conexión del dispositivo móvil, y por lo tanto a la necesidad y número de reasignaciones (de rutas y enlaces de comunicación) necesarias para mantener la fiabilidad *end-to-end* por encima de una fiabilidad objetivo a medida que el dispositivo móvil se desplaza. En este contexto, este apartado analiza el impacto que dicha selección tiene sobre el área en el cual se proporciona una fiabilidad *end-to-end* superior a la fiabilidad *end-to-end* objetivo de la aplicación industrial a la que se da soporte. Es importante destacar que cuanto mayor sea dicha área, menor será el número de reasignaciones de rutas y enlaces de comunicación necesarios para garantizar que la calidad experimentada por el dispositivo supera a la calidad objetivo requerida por la aplicación. El análisis realizado asume que el *Network Manager* dispone de información actualizada de la calidad de los enlaces de comunicación entre todos los dispositivos estáticos de la red, asunción apropiada gracias a la calidad de los enlaces de comunicación reportada por los dispositivos en los *Health Reports*. El análisis realizado puede servir de ayuda tanto para la selección de los dispositivos estáticos retransmisores, como para ayudar al posicionamiento de los dispositivos estáticos retransmisores durante el proceso de despliegue de la red.

### 6.2.1 Fiabilidad *end-to-end*

La fiabilidad *end-to-end* de una ruta multi-salto puede ser obtenida a partir de la *PDR* de cada salto y del número de enlaces de comunicación asignados en cada salto. Cuando todos los enlaces de comunicación de un determinado salto están asignados después del salto anterior, la fiabilidad de la ruta completa (fiabilidad *end-to-end*) puede obtenerse como el producto de la fiabilidad obtenida en cada salto [27]. En el caso de tener  $L$  enlaces de comunicación para las transmisiones en un determinado salto, la fiabilidad de dicho salto puede obtenerse a partir de la *PDR* del salto como:

$$Fiabilidad_{Salto} = 1 - (1 - PDR)^L \quad (6-1)$$

Así, la fiabilidad *end-to-end* de una ruta multi-salto puede ser estimada como:

$$Fiabilidad_{end-to-end} = \prod_{h=1}^H \left( 1 - (1 - PDR_h)^{L_h} \right) \quad (6-2)$$

donde  $H$  representa el número de saltos en la ruta,  $L_h$  representa el número de enlaces de comunicación asignados al salto  $h$ , y  $PDR_h$  es la *PDR* del salto  $h$ , que puede ser estimada a partir de la ecuación (3-10), en función de la distancia entre el dispositivo origen y el dispositivo destino del correspondiente salto, y en función de los parámetros del modelado del canal radio.

Cuando se emplean varias rutas también es posible determinar la fiabilidad *end-to-end* a través de una expresión analítica. En el caso en el que el paquete solamente sea transmitido usando una ruta alternativa cuando falla la transmisión en el primer salto en la ruta anterior, es posible estimar la fiabilidad *end-to-end* como:

$$Fiabilidad_{end-to-end} = \left( \prod_{h_1=1}^{H_1} \left( 1 - (1 - PDR_{h_1})^{L_{h_1}} \right) \right) + \sum_{r=2}^R \left( \prod_{z=1}^{r-1} (1 - PDR_{1z})^{L_{1z}} \cdot \prod_{h_r=1}^{H_r} \left( 1 - (1 - PDR_{h_r})^{L_{h_r}} \right) \right) \quad (6-3)$$

donde  $R$  es el número de rutas asignadas,  $H_r$  es la cantidad de saltos en la ruta  $r$ ,  $h_r$  es el salto  $h$  de la ruta  $r$ ,  $PDR_{h_r}$  es la tasa de entrega de paquetes en el salto  $h$  de la ruta  $r$ , y  $L_{h_r}$  es el número de enlaces de comunicación asignados al salto  $h$  en la ruta  $r$ . El primer sumando de la ecuación (6-3) representa la fiabilidad obtenida por utilizar la primera ruta, mientras que el segundo sumando representa la fiabilidad obtenida por utilizar el resto de rutas. Además, mientras que el primer factor del segundo sumando se corresponde con la probabilidad de que el paquete haya fallado en el primer salto en las anteriores  $r-1$  rutas, el segundo factor representa la fiabilidad obtenida por utilizar la ruta  $r$ . Si despreciamos los errores de comunicación en los saltos distintos al primer salto<sup>22</sup>, es posible expresar la fiabilidad *end-to-end* como:

$$Fiabilidad_{end-to-end} = \left( 1 - (1 - PDR_1)^{L_1} \right) + \sum_{r=2}^R \left( \prod_{z=1}^{r-1} (1 - PDR_r)^{L_{r-1}} \cdot (1 - (1 - PDR_r)^{L_r}) \right) \quad (6-4)$$

Finalmente, en el caso en el que se empleen varias rutas y el paquete sea transmitido por todas las rutas simultáneamente, la fiabilidad *end-to-end* podría ser estimada con la ecuación (6-5). En este caso, si despreciamos los errores de comunicación en los saltos distintos al primer salto<sup>22</sup>, la fiabilidad *end-to-end* podría ser estimada con la ecuación (6-6).

$$Fiabilidad_{end-to-end} = 1 - \prod_{r=1}^R \left( 1 - \prod_{h_r=1}^{H_r} \left( 1 - (1 - PDR_{h_r})^{L_{h_r}} \right) \right) \quad (6-5)$$

$$Fiabilidad_{end-to-end} = 1 - \prod_{r=1}^R (1 - PDR_r)^{L_r} \quad (6-6)$$

<sup>22</sup> Este supuesto podría considerarse en un escenario donde se establece una ruta entre un dispositivo móvil y un *Gateway* utilizando otros dispositivos estáticos como retransmisores. En este caso, si el despliegue de los dispositivos estáticos ha sido realizado correctamente, la PDR de los saltos entre dispositivos estáticos debería ser muy alta con respecto a la PDR del salto desde el dispositivo móvil, sobre todo cuando este dispositivo no se encuentra en condiciones óptimas de propagación con su dispositivo estático retransmisor.

## 6.2.2 Identificación de dispositivos retransmisores

Tal y como se ha explicado anteriormente, este estudio se centra en el primer salto desde el dispositivo móvil hasta un retransmisor estático. Si consideramos que solo se dispone de único enlace de comunicación entre estos dos dispositivos, el área en la que se proporciona una fiabilidad *end-to-end* superior a la fiabilidad *end-to-end* objetivo presenta una forma de círculo<sup>23</sup>. Denominaremos  $d_{th,1}$  al radio de dicho círculo. Es importante destacar que cuando el dispositivo móvil salga de dicho área, será necesario redefinir sus rutas y enlaces de comunicación para que se pueda seguir garantizando la fiabilidad de sus transmisiones. Si aumenta dicha área, se reduce el porcentaje de veces que un dispositivo móvil deberá redefinir sus rutas y enlaces de comunicación para mantener una fiabilidad *end-to-end* por encima de la fiabilidad objetivo, y por lo tanto la correspondiente señalización y overhead. La Tabla 6-1 presenta el valor de  $d_{th,1}$  para diferentes valores de fiabilidad *end-to-end* objetivo cuando se consideran los entornos de propagación presentados en la Tabla 3-3.

Tabla 6-1. Distancia  $d_{th,1}$  en metros para diferentes valores de fiabilidad *end-to-end* objetivo y entornos de propagación.

Fiabilidad <i>end-to-end</i> objetivo	LOS	OBS-light	OBS-heavy	All topographies
0.99	207	137	20	33
0.95	318	220	38	59
0.90	399	283	52	81

Si se dispone de un segundo enlace de comunicación para la comunicación entre los dos dispositivos, dicho enlace puede ser asignado según dos enfoques diferentes (Figura 6-1): (1) solo se considera una ruta desde el dispositivo móvil a un dispositivo estático y los dos enlaces de comunicación son asignados a dicha ruta, o (2) se seleccionan dos dispositivos retransmisores estáticos para el primer salto, y por lo tanto dos rutas desde el dispositivo móvil, y se asigna un enlace de comunicación a cada una de las rutas. El enfoque empleado tiene un impacto sobre el área en la que se puede proporcionar una fiabilidad *end-to-end* superior a la fiabilidad *end-to-end* objetivo. Si los dos enlaces de comunicación se asignan a una misma ruta, el área en cuestión presenta de nuevo una

<sup>23</sup> Este estudio asume que la propagación de la señal depende únicamente de la distancia entre el emisor y el receptor, si bien se consideran diferentes condiciones de propagación radio que tienen embebidos los obstáculos presentes.

forma de círculo con radio  $d_{th,2}$ . Puede utilizarse la ecuación (6-1) con  $L$  igual a 2 para calcular la PDR necesaria en cada una de los intentos de transmisión para alcanzar la fiabilidad objetivo. Una vez determinada la PDR necesaria en cada una de los dos intentos de transmisión, el valor de  $d_{th,2}$  puede ser obtenido directamente a través de la curva de PDR con la distancia, como por ejemplo la curva de PDR presentada en la Figura 3-12 para el caso de  $P_{Tx}=3$  dBm,  $N= -90$  dBm y  $B= 133$  bytes. Por el contrario, si el segundo enlace de comunicación es asignado a una ruta diferente, el cálculo del área en el cual la fiabilidad *end-to-end* es superior a la fiabilidad *end-to-end* objetivo no es tan evidente, y es necesaria una resolución numérica que calcule la fiabilidad *end-to-end* que experimentaría un dispositivo móvil en todas las posibles posiciones en la zona bajo estudio. Para obtener el área en la que se proporcionaría a un dispositivo móvil una fiabilidad *end-to-end* superior a una fiabilidad objetivo son necesarios dos pasos. En primer lugar es necesario determinar la fiabilidad *end-to-end* de las distintas posiciones. Para ello, la resolución numérica hace uso de las ecuaciones (6-3), (6-4), (6-5) o (6-6)<sup>24</sup>. En segundo lugar, es necesario identificar aquellas posiciones en las que se proporciona a un dispositivo móvil una fiabilidad *end-to-end* superior a la fiabilidad objetivo.

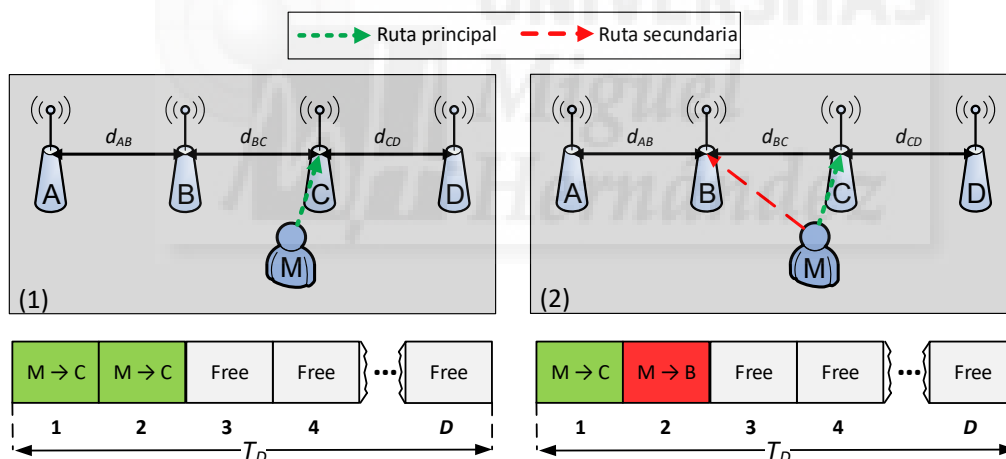


Figura 6-1. Alternativas de asignación de dos enlaces de comunicación para la transmisión de datos desde un mismo dispositivo móvil.

A modo de ejemplo, la Figura 6-2 muestra el área en la que se proporcionaría a un dispositivo móvil una fiabilidad *end-to-end* superior a una fiabilidad objetivo de 0.95 en función de la separación entre los dos dispositivos estáticos que son escogidos para cada una de las rutas desde el dispositivo móvil (A y B) en condiciones radio All topographies.

<sup>24</sup> Según se detalla en el apartado 6.2.1, el uso de cada ecuación depende de si el paquete es o no transmitido por todas las rutas simultáneamente, y de si se desprecian o no los errores de comunicación en los saltos distintos al primer salto.



Para poder comparar los distintos entornos de propagación radio, dicha distancia se presenta normalizada por la distancia  $d_{th\_1}$  ( $d_{0.95\_1}$  cuando la fiabilidad *end-to-end* objetivo es de 0.95). Los resultados presentados en la Figura 6-2 muestran cómo el área presenta una forma de círculo cuando los dos enlaces de comunicación son asignados a la misma ruta (es decir cuando solo se escoge un dispositivo retransmisor y por lo tanto  $d_{AB}=0$ , Figura 6-2a). A medida que  $d_{AB}$  aumenta el área cubierta se aproxima a una elipse. Sin embargo, a partir de una distancia de aproximadamente  $d_{AB}=2.5 \cdot d_{0.95\_1}$  (Figura 6-2f), la zona intermedia entre A y B comienza a estrecharse. De hecho, para separaciones entre A y B superiores a  $d_{AB}=4 \cdot d_{0.95\_1}$  (Figura 6-2j), se obtienen dos áreas separadas. Es importante resaltar que esta situación se ha de evitar puesto que un dispositivo móvil tendría que ser reconfigurado antes de pasar de una zona a la otra. A partir de estos resultados, la Figura 6-3 presenta el área en la que se proporciona una fiabilidad *end-to-end* superior a 0.95 en función de la separación entre los dispositivos escogidos como primer salto en cada una de las dos rutas que permiten conectar un dispositivo móvil con su correspondiente *Gateway*. La figura muestra la evolución de dicho área para los diferentes entornos de propagación radio. Los resultados presentados en la Figura 6-3 muestran que el área se maximiza cuando la separación entre A y B se encuentra entre 2.5 y 3 veces la distancia  $d_{0.95\_1}$ , dependiendo de las condiciones de propagación. Los resultados obtenidos muestran que tras esta separación óptima, el área en la cual se garantizar una fiabilidad *end-to-end* superior a la demandada decrece, e incluso llega a ser menor que cuando se considera que los dos enlaces de comunicación están asignados al mismo dispositivo (representado por el caso  $d_{AB}=0$ ). Las mismas tendencias son obtenidas, aunque con diferentes valores, para una fiabilidad *end-to-end* objetivo de 0.99, tal y como se muestra en la Figura 6-4 y la Figura 6-5.

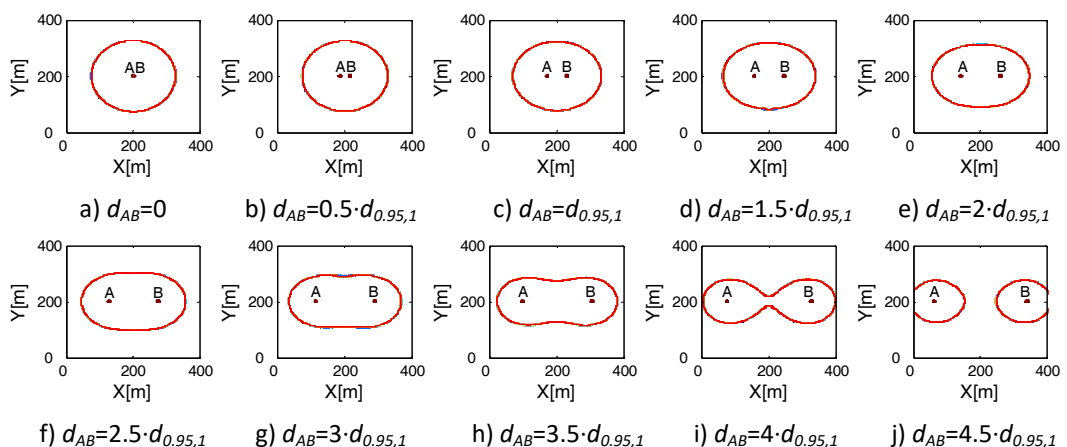


Figura 6-2. Área en la que se proporciona una fiabilidad *end-to-end* superior a una fiabilidad objetivo del 0.95 en función de la separación entre A y B normalizada por la distancia  $d_{0.95,1}$ .

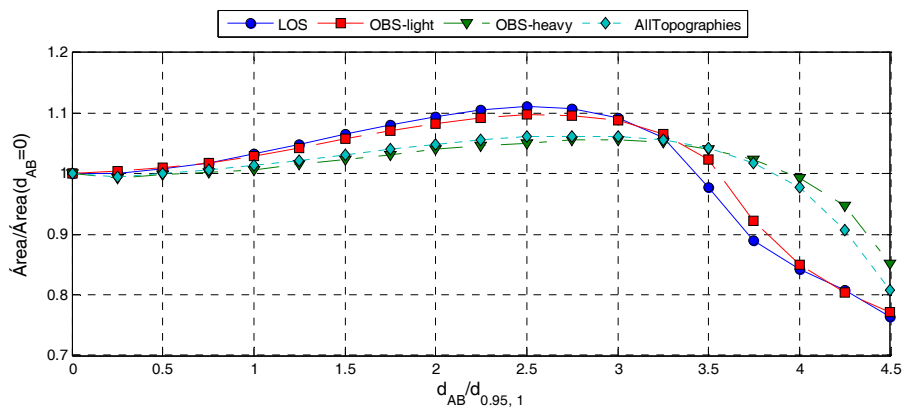


Figura 6-3. Área en la que se proporciona una fiabilidad *end-to-end* superior a una fiabilidad objetivo del 0.95 en función de la separación entre los dispositivos retransmisores de las dos rutas desde el dispositivo móvil ( $L_A=1$  y  $L_B=1$ ).

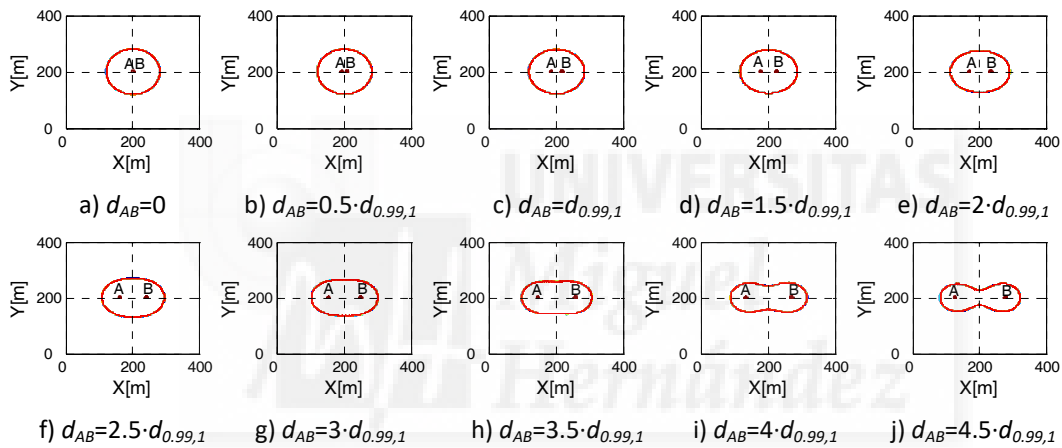


Figura 6-4. Área en la que se proporciona una fiabilidad *end-to-end* superior a una fiabilidad objetivo del 0.99 en función de la separación entre A y B normalizada por la distancia  $d_{0.99,1}$ .

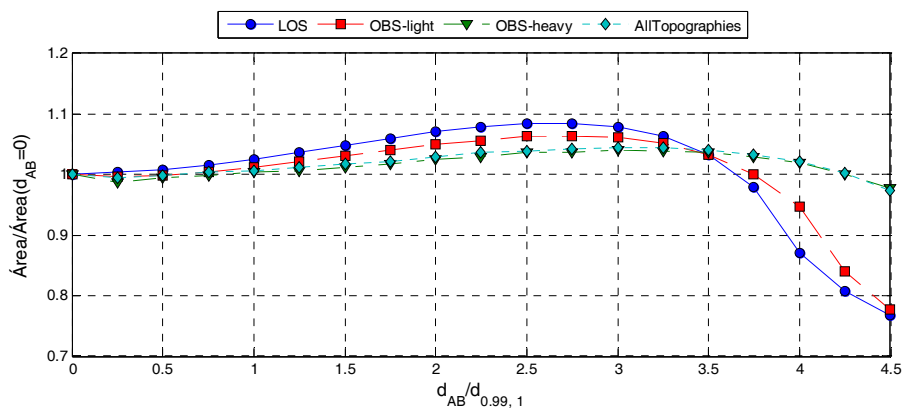


Figura 6-5. Área en la que se proporciona una fiabilidad *end-to-end* superior a una fiabilidad objetivo del 0.99 en función de la separación entre los dispositivos retransmisores de las dos rutas desde el dispositivo móvil ( $L_A=1$  y  $L_B=1$ ).

Es posible realizar el mismo análisis para el caso en que, como indica WirelessHART, se asignen dos enlaces de comunicación para el primer salto de la ruta principal ( $L_A=2$ ) y un enlace de comunicación para el primer salto de la ruta secundaria ( $L_B=1$ ). Para este caso, la Figura 6-6 presenta el área en la que se proporciona una fiabilidad *end-to-end* superior a una fiabilidad objetivo del 0.95 en función de la separación entre los dispositivos escogidos como primer salto en cada ruta. Los resultados obtenidos muestran que el mayor área se obtiene cuando los dispositivos escogidos están separados por una distancia de entre 3.5 y 5 veces la distancia  $d_{th\_1}$ , dependiendo de las condiciones de propagación y de la fiabilidad *end-to-end* objetivo. Las mismas tendencias son obtenidas en la Figura 6-7, cuando se requiere una fiabilidad *end-to-end* superior a una fiabilidad objetivo del 0.99.

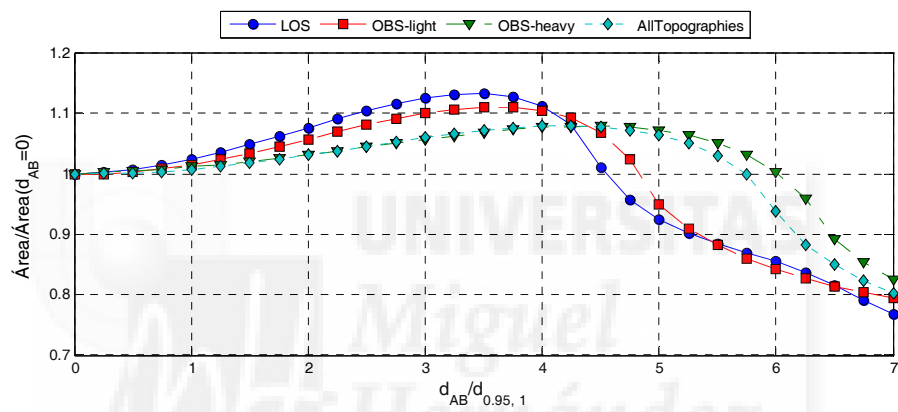


Figura 6-6. Área en la que se proporciona una fiabilidad *end-to-end* superior a una fiabilidad objetivo del 0.95 en función de la separación entre los dispositivos retransmisores de las dos rutas desde el dispositivo móvil ( $L_A=2$  y  $L_B=1$ ).

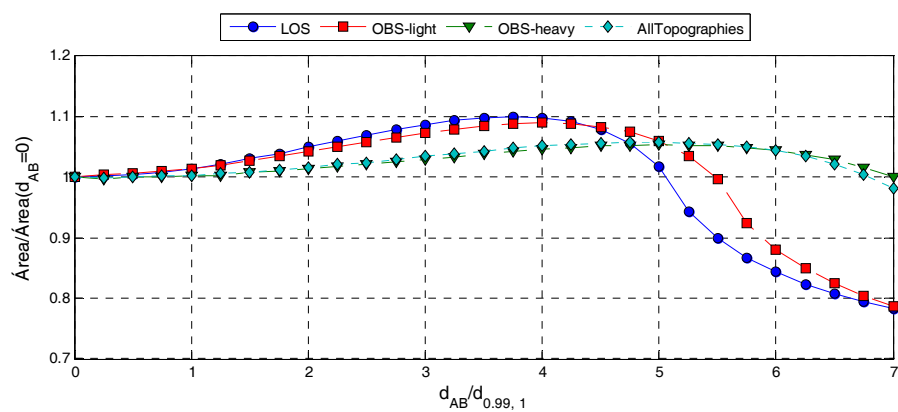


Figura 6-7. Área en la que se proporciona una fiabilidad *end-to-end* superior a una fiabilidad objetivo del 0.99 en función de la separación entre los dispositivos retransmisores de las dos rutas desde el dispositivo móvil ( $L_A=2$  y  $L_B=1$ ).

### 6.2.3 Identificación computacionalmente eficiente de dispositivos retransmisores

El apartado anterior ha evaluado la separación entre dispositivos seleccionados para establecer múltiples rutas entre un dispositivo móvil y el dispositivo *Gateway*. La identificación de la separación óptima requiere una resolución numérica con un coste computacional no aceptable para sistemas tiempo real. En este apartado se propone una metodología computacionalmente eficiente para la identificación de la separación entre dispositivos estáticos que conforman las dos rutas utilizadas por el dispositivo móvil. Esta metodología ofrece resultados próximos a los obtenidos cuando se considera la separación óptima obtenida mediante la resolución numérica.

La metodología propuesta se basa en aproximar la separación óptima entre A y B a la suma de las distancias  $d_{th,L_A}$  y  $d_{th,L_B}$ , donde  $d_{th,L_A}$  es la distancia a la que se obtiene la fiabilidad *end-to-end* objetivo utilizando la ruta en la que interviene el dispositivo A como dispositivo retransmisor de los datos del dispositivo móvil con  $L_A$  enlaces de comunicación, y donde  $d_{th,L_B}$  es la misma distancia pero usando la ruta que emplea el dispositivo B como dispositivo retransmisor con  $L_B$  enlaces de comunicación. En el caso en el que solo hay un enlace de comunicación con A o B,  $d_{th,1}$  puede ser obtenida directamente a través de la curva de PDR con la distancia, como por ejemplo la curva de PDR presentada en la Figura 3-12 para el caso de  $P_{Tx}=3$  dBm,  $N=-90$  dBm y  $B=133$  bytes. En el caso de que  $L_A$  o  $L_B$  sean distintos a 1, es necesario determinar la PDR equivalente que proporciona la fiabilidad *end-to-end* objetivo cuando se disponen de  $L_A$  o  $L_B$  enlaces de comunicación ( $PDR_{q_L}$ ). Para ello, se despeja el valor de la PDR de la ecuación (6-1) para  $L$  igual a  $L_A$  y  $L_B$ , y se cambia *Fiabilidad<sub>Salto</sub>* por *Fiabilidad<sub>Objetivo</sub>* resultando en:

$$PDR_{q_L} = 1 - \sqrt[L]{1 - \text{Fiabilidad}_{\text{Objetivo}}} \quad (6-7)$$

Así, las distancias  $d_{th,L_A}$  y  $d_{th,L_B}$  pueden ser también obtenidas directamente a través de la curva de PDR con la distancia, como por ejemplo la curva de PDR presentada en la Figura 3-12. En este caso,  $d_{th,L_A}$  y  $d_{th,L_B}$  se corresponden con el valor de la distancia a la que se obtiene una PDR igual a  $PDR_{q_{L_A}}$  y  $PDR_{q_{L_B}}$ , respectivamente, utilizando la ecuación (6-7) para determinar  $PDR_{q_{L_A}}$  y  $PDR_{q_{L_B}}$ .

A continuación, se presenta la comparación del área en la que se proporciona una fiabilidad *end-to-end* objetivo cuando los dispositivos retransmisores han sido seleccionados separados la distancia  $d_{AB}$  que maximiza el área ( $d_{AB}$  Óptima), y cuando han sido seleccionados separados una distancia  $d_{th,L_A} + d_{th,L_B}$  ( $d_{AB} = d_{th,L_A} + d_{th,L_B}$ ). La

Figura 6-8 presenta esta comparación para diferentes condiciones de propagación radio y diferentes valores de fiabilidad *end-to-end* objetivo cuando se asignan dos enlaces de comunicación por la ruta principal y un enlace de comunicación por la ruta secundaria. La Figura 6-8 muestra que se obtienen resultados similares con  $d_{AB}$  Óptima y con  $d_{AB}=d_{th,LA}+d_{th,LB}$  (aproximación computacionalmente eficiente). Es importante resaltar, que utilizar la separación  $d_{th,LA}+d_{th,LB}$  evita la necesidad de una resolución numérica que realice un barrido completo de separaciones entre los dispositivos a seleccionar.

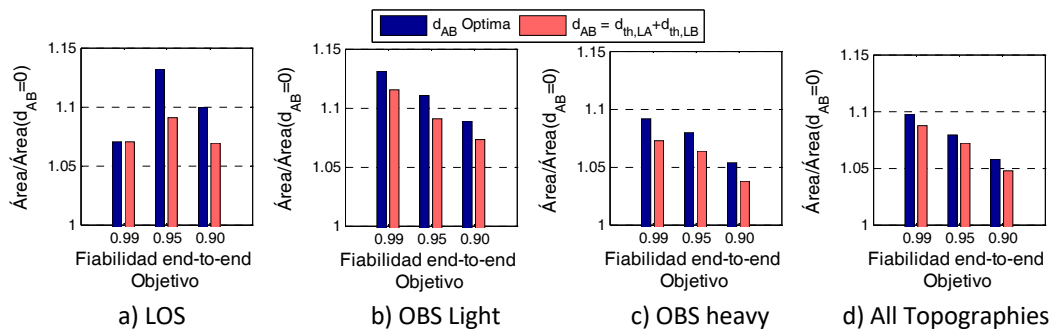


Figura 6-8. Comparación del área en la que se proporciona una fiabilidad *end-to-end* superior a la fiabilidad objetivo (2 enlaces de comunicación por la ruta principal y 1 enlace de comunicación por la ruta secundaria).

La Figura 6-9 y la Figura 6-10 presentan la comparación cuando se asigna un enlace de comunicación por la ruta principal y un enlace de comunicación por la ruta secundaria, y cuando se asignan dos enlaces de comunicación por la ruta principal y dos enlaces de comunicación por la ruta secundaria, respectivamente. Los resultados presentados en la Figura 6-9 y la Figura 6-10, muestran que la metodología propuesta para la selección de la separación entre los dispositivos encargados de retransmitir los paquetes de datos obtiene resultados próximos a los obtenidos al identificar la separación óptima cuando se varía el número de enlaces.

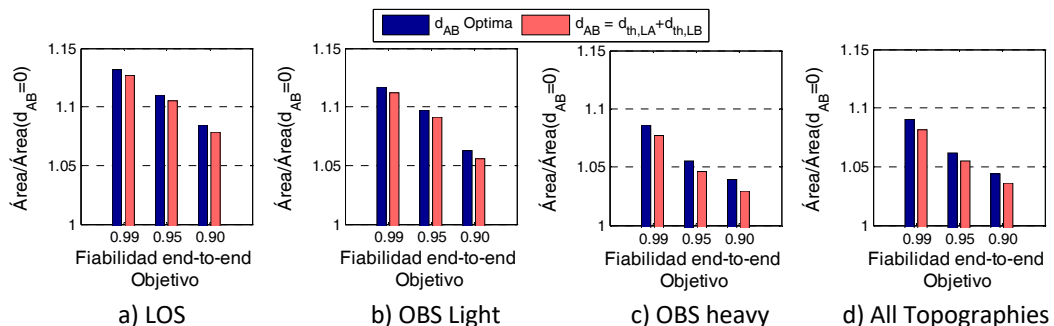


Figura 6-9. Comparación del área en la que se proporciona una fiabilidad *end-to-end* superior a la fiabilidad objetivo (1 enlace de comunicación por la ruta principal y 1 enlace de comunicación por la ruta secundaria).

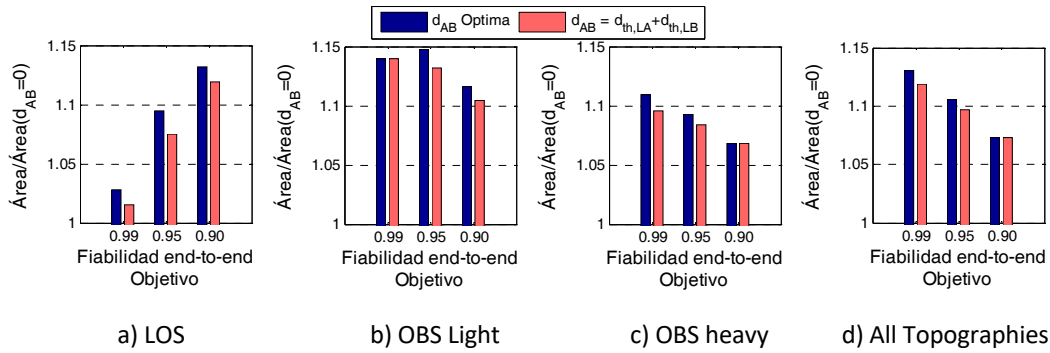


Figura 6-10. Comparación del área en la que se proporciona una fiabilidad *end-to-end* superior a la fiabilidad objetivo (2 enlaces de comunicación por la ruta principal y 2 enlaces de comunicación por la ruta secundaria).

Los resultados anteriores fueron obtenidos asumiendo que una vez los datos del dispositivo móvil eran transmitidos al primer retransmisor estático, la transmisión de los mismos (utilizando otros dispositivos estáticos) hasta el *Gateway* se realizaba sin errores. La propuesta también puede ser aplicable en el caso de que haya errores de transmisión en los enlaces de comunicación entre los dispositivos estáticos que conforman la ruta principal y secundaria. En este caso, es necesario determinar la PDR equivalente que proporciona la fiabilidad *end-to-end* objetivo cuando se disponen de  $L_A$  o  $L_B$  enlaces de comunicación en el primer salto de la ruta principal y la ruta secundaria, respectivamente, y cuando se consideran los errores de transmisión en los enlaces de comunicación entre los dispositivos estáticos que conforman los saltos de la ruta principal y secundaria. Para ello, se despeja el valor de la PDR de la ecuación (6-2) para  $L_1$  igual a  $L_A$  y  $L_B$ , y se cambia *Fiabilidad<sub>end-to-end</sub>* por *Fiabilidad<sub>Objetivo</sub>* resultando en:

$$PDR_{q_{L_1}} = 1 - \sqrt[L_1]{1 - \frac{\text{Fiabilidad}_{\text{Objetivo}}}{\prod_{h=2}^H (1 - (1 - PDR_h)^{L_h})}} \quad (6-8)$$

Así, las distancias  $d_{th,L_A}$  y  $d_{th,L_B}$  pueden ser también obtenidas directamente a través de la curva de PDR con la distancia, como por ejemplo la curva de PDR presentada en la Figura 3-12 para el caso de  $P_{Tx}=3$  dBm,  $N= -90$  dBm y  $B= 133$  bytes. En este caso,  $d_{th,L_A}$  y  $d_{th,L_B}$  se corresponden con el valor de la distancia a la que se obtiene una PDR igual a  $PDR_{q_{L_A}}$  y  $PDR_{q_{L_B}}$ , respectivamente, utilizando la ecuación (6-8) para determinar  $PDR_{q_{L_A}}$  y  $PDR_{q_{L_B}}$ .

### 6.2.4 Localización de dispositivos retransmisores

Si no se dispone de información del movimiento y zonas de desplazamiento del dispositivo móvil para el que la red debe asignar rutas y enlaces de comunicación, es recomendable que la red seleccione como dispositivos retransmisores para el primer salto desde el dispositivo móvil dos dispositivos que estén separados entre ellos una distancia  $d_{opt}$ <sup>25</sup>. En este caso, el dispositivo móvil se ha de encontrar a la misma distancia del dispositivo a escoger como primer salto de la ruta principal y del dispositivo a escoger como primer salto de la ruta secundaria. De esta forma, se maximiza la distancia mínima hasta el límite del área sobre la que se proporciona una fiabilidad *end-to-end* superior a la fiabilidad objetivo (Situación 1 en la Figura 6-11).

Si se dispone de información del movimiento y zonas de desplazamiento del dispositivo móvil para el que la red debe asignar rutas y enlaces de comunicación, es recomendable también que la red seleccione dos dispositivos que estén separados entre ellos una distancia  $d_{opt}$ <sup>25</sup>. Sin embargo, en el caso de que se conozca de antemano la trayectoria del dispositivo móvil, convendría escoger como primer salto de la ruta principal un dispositivo que estuviera a una distancia  $d_{th,LA}$  del dispositivo móvil en la dirección de desplazamiento<sup>26</sup>. Además, en este caso convendría escoger como primer salto de la ruta secundaria un dispositivo que estuviera a una distancia  $d_{th,LA} + d_{opt}$  del dispositivo móvil en la dirección de desplazamiento (Situación 2 en la Figura 6-11).

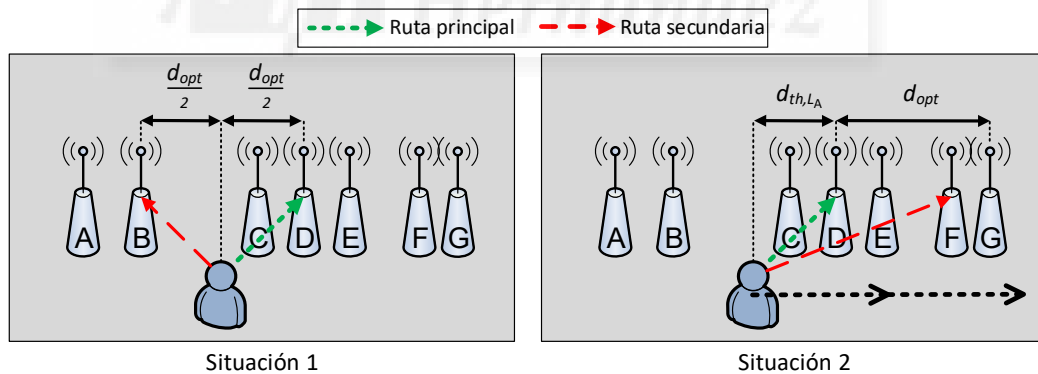


Figura 6-11. Localización de los dispositivos retransmisores en el primer salto desde el dispositivo móvil cuando no se dispone de información de la movilidad del dispositivo (Situación 1) y cuando sí se dispone (Situación 2).

<sup>25</sup> En el caso de utilizar la metodología computacionalmente eficiente, los dos dispositivos han de estar separados entre ellos una distancia  $d_{th,LA} + d_{th,LB}$ .

<sup>26</sup>  $d_{th,LA}$  se corresponde con el valor de la distancia a la que se obtiene una PDR igual a  $PDRq_{LA}$ , utilizando la ecuación (6-7) para determinar  $PDRq_{LA}$ .

### 6.3 Reasignación de rutas y enlaces de comunicación

En el estándar WirelessHART, el *Network Manager* continuamente monitoriza la red en base a la calidad de los enlaces de comunicación reportados por los dispositivos a través de sus *Health Reports*. Así, en el caso de que un dispositivo se desplace y pierda la conexión con la red (o la calidad caiga por debajo de un umbral de calidad aceptable), el *Network Manager* deberá reasignar las rutas y los enlaces de comunicación con el dispositivo. El estándar WirelessHART especifica que es necesario tener asignados dos enlaces de comunicación por cada salto de la mejor ruta (principal) y un enlace de comunicación por cada salto de la segunda mejor ruta (secundaria). Realizar continuas reasignaciones de las rutas y los enlaces de comunicación puede implicar la necesidad de disponer de un alto número de enlaces de comunicación dedicados a la gestión de la red, lo cual afectaría a la eficiencia y escalabilidad de la red. Además, el *Network Manager* ha de comunicar los cambios en rutas y enlaces de comunicación a todos los dispositivos afectados. Cualquier error en la comunicación de dichos cambios, podría dejar desconectado (o parcialmente desconectado) a uno o varios dispositivos de la red. En este contexto, en este apartado se proponen, evalúan y comparan diferentes técnicas para la reasignación de rutas y enlaces de comunicación. Las propuestas buscan reducir el número de reasignaciones que se han de realizar durante el desplazamiento de un dispositivo móvil, al tiempo que se mantienen los niveles de fiabilidad exigidos por las aplicaciones. Las técnicas propuestas tienen en cuenta las diferentes rutas utilizadas en la transmisión de datos por parte de un dispositivo móvil y su fiabilidad *end-to-end*.

#### 6.3.1 Reasignación de rutas y enlaces de comunicación en WirelessHART

Una posible forma de reasignar las rutas y los enlaces de comunicación consiste en que el *Network Manager* asigne en todo momento como ruta principal la ruta por la que se obtiene la mayor fiabilidad, y como ruta secundaria la ruta por la que se obtiene la segunda mayor fiabilidad. Esta técnica, denominada como WH-RLS (*WirelessHART Route and Link Selection*), será utilizada como referencia en la comparación de las técnicas propuestas. La Figura 6-12 muestra a modo de ejemplo cómo operaría esta técnica en cuanto a la asignación de enlaces comunicación para la ruta principal y secundaria. Tal y como se indica en el estándar WirelessHART, se asignan en primer lugar dos enlaces de comunicación por cada salto de la ruta principal (ruta a través del dispositivo A en tonalidades verdes en la Figura 6-12), y a continuación un enlace de comunicación por cada salto de la ruta secundaria (ruta a través del dispositivo B en tonalidades rojas en la Figura 6-12). En este ejemplo, la ruta verde es considerada de mayor calidad al estar el dispositivo M más cercano al dispositivo retransmisor A.



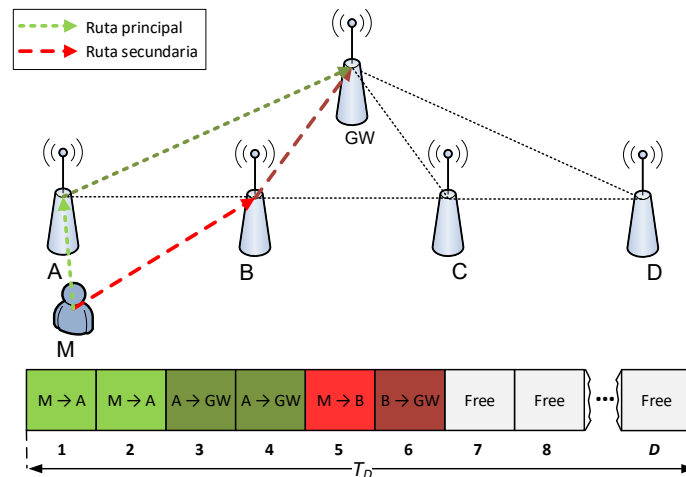


Figura 6-12. Ejemplo de asignación de rutas y enlaces de comunicación para el dispositivo M realizada en base a los requisitos de WirelessHART.

En WirelessHART, el *Network Manager* monitoriza continuamente la red en base a la calidad de los enlaces de comunicación reportados por los dispositivos. En base a dicha calidad, la red debe reconfigurar las rutas y enlaces de comunicación de cada dispositivo. La Figura 6-13 muestra diferentes instantáneas de las rutas y la asignación de enlaces de comunicación que el *Network Manager* asignaría al dispositivo M en diferentes posiciones (P1, P2, P3, P4, P5 y P6) en el escenario de ejemplo. Cuando el dispositivo se desplaza en línea recta desde P1 hasta P6, se dan dos situaciones bien diferenciadas. Entre la posición P1 y P2, la posición P3 y P4, y la posición P5 y P6, se produciría un intercambio entre la ruta principal y la ruta secundaria que implicaría cambiar todos los enlaces de comunicación previamente asignados para que en primer lugar estén asignados los enlaces de comunicación de la ruta principal y posteriormente los de la ruta secundaria. Por otro lado, entre la posición P2 y P3, y la posición P4 y P5, se produciría únicamente un cambio de la ruta secundaria, lo cual únicamente implicaría cambiar los enlaces de comunicación asignados para la ruta secundaria, sin afectar a los enlaces de comunicación de la ruta principal. En este contexto, se introduce el concepto de reasignación de rutas *SOFT* y *HARD*. Se define una reasignación de rutas *HARD* como la reasignación de rutas que implica un cambio de la ruta principal y la ruta secundaria, y por tanto supone un cambio de todos los enlaces de comunicación previamente asignados a un dispositivo. Se define una reasignación de rutas *SOFT* como la reasignación de rutas que implica únicamente el cambio de una de las rutas (principal o secundaria), y por tanto supone un cambio únicamente de los enlaces de comunicación previamente asignados al dispositivo para transmitir datos a través de la ruta afectada por el cambio. Una reasignación de rutas

*HARD* puede suponer que el dispositivo podría quedarse sin enlaces de comunicación válidos si se produjeran errores en la comunicación a los dispositivos afectados de los cambios necesarios. El impacto de estos errores es menor en el caso de una reasignación de rutas *SOFT*, puesto que al menos una de las rutas podría seguir siendo utilizada para la transmisión de datos por parte del dispositivo móvil. Además, es importante resaltar que una reasignación *HARD* requiere más enlaces de comunicación para la señalización al suponer más cambios con respecto a la anterior asignación de rutas y enlaces de comunicación. En el ejemplo presentado en la Figura 6-13 en que el dispositivo móvil se desplaza en línea recta desde P1 hasta P6, el *Network Manager* realizaría una primera asignación de rutas y enlaces de comunicación, y posteriormente realizaría tres reasignaciones de rutas *HARD* (P1 a P2, P3 a P4, y P5 a P6) y dos reasignaciones de rutas *SOFT* (P2 a P3, y P4 a P5).

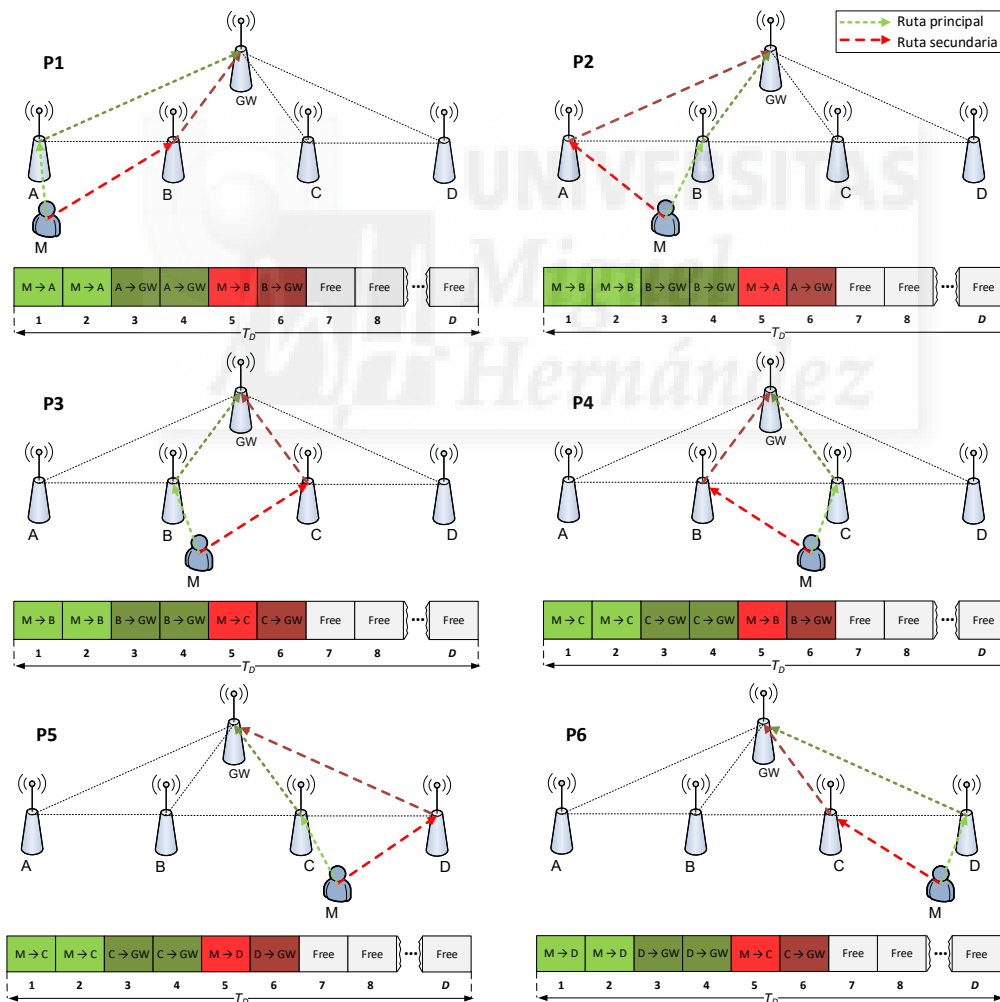


Figura 6-13. Asignación de rutas y enlaces de comunicación realizada con la técnica de referencia WH-RLS para diferentes posiciones del dispositivo M en el escenario de ejemplo.

### 6.3.2 Propuestas de algoritmos de reasignación en movilidad

Las tres técnicas de reasignación de rutas y enlaces de comunicación que se proponen en este apartado tratan de reducir el número de reasignaciones necesarias al tiempo que garantizan una fiabilidad *end-to-end* objetivo determinada por la aplicación a la que da soporte la red inalámbrica industrial. El principal beneficio al reducir el número de reasignaciones necesarias es la reducción de los enlaces de comunicación necesarios para la señalización. La primera de las técnicas propuestas, denominada RLS (*Route and Link Selection for mobile IWSN*), se centra en evitar las reasignaciones *HARD* y solo desencadena una reasignación en caso de que se estime que la fiabilidad actual es menor a la fiabilidad determinada por la aplicación. La segunda técnica, denominada RLS2 (*Route and Link Selection for mobile IWSN with 2 links per hop*), pretende mejorar la fiabilidad de RLS a costa de aumentar el número de enlaces por ruta pues asigna 2 enlaces de comunicación a cada salto de la ruta secundaria. La tercera técnica, denominada RLSS (*Route and Link Selection for mobile IWSN with Shared links*), pretende reducir el número de enlaces de comunicación empleados por RLS2 haciendo que cada transmisión realizada por el dispositivo móvil (primer salto de la ruta) pueda ser recibida tanto por el dispositivo estático retransmisor de la ruta principal, como por el dispositivo estático retransmisor de la ruta secundaria. Ambos deberán por tanto estar en modo recepción en el mismo instante a la escucha de la transmisión del dispositivo móvil, explotando con ello la diversidad espacial que ofrecen al estar en diferentes posiciones. A continuación se presentan con más detalle cada una de las tres técnicas de reasignación propuestas.

#### RLS, Route and Link Selection for mobile IWSN

RLS busca evitar las reasignaciones de rutas *HARD*, y reducir el número de reasignaciones de rutas *SOFT*. Al igual que en la técnica de referencia WH-RLS (apartado 6.3.1), el *Network Manager* evalúa continuamente la calidad de los enlaces de comunicación asignados a la ruta principal y secundaria, y a otras posibles rutas candidatas a ser escogidas como ruta principal o secundaria. RLS propone que el *Network Manager* solo cambie la ruta principal, o la ruta secundaria, en el caso de que se estime que la fiabilidad *end-to-end* conjunta de ambas rutas vaya a ser inferior a la fiabilidad *end-to-end* objetivo requerida por la aplicación soportada, y exista alguna otra alternativa que haga que se consiga esa fiabilidad objetivo. En este caso, RLS solo cambia la ruta y los enlaces de comunicación de la ruta con menor fiabilidad *end-to-end*, de entre las dos rutas asignadas entre origen y destino, por la ruta y los enlaces de comunicación de la nueva ruta con mayor fiabilidad *end-to-end*.

La Figura 6-14 muestra cómo operaría RLS sobre el ejemplo utilizado para explicar el funcionamiento de WirelessHART. Entre la posición P1 y P2, la posición P3 y P4, y la posición P5 y P6, RLS no necesitaría cambio alguno en la asignación de rutas y enlaces de comunicación. Por otro lado, entre la posición P2 y P3 se produciría un cambio de la ruta principal y de la correspondiente asignación de enlaces de comunicación, mientras que entre la posición P4 y P5 se produciría un cambio de la ruta secundaria y de la correspondiente asignación de enlaces de comunicación. En resumen, para el ejemplo de la Figura 6-14 donde el dispositivo móvil se desplaza en línea recta desde P1 hasta P6, el *Network Manager* realizaría una primera asignación de rutas y enlaces de comunicación, y posteriormente realizaría únicamente dos reasignaciones de rutas *SOFT*. En el caso de presentado anteriormente para WirelessHART (Figura 6-13) se realizarían tres reasignaciones de rutas *HARD* y dos reasignaciones de rutas *SOFT*.

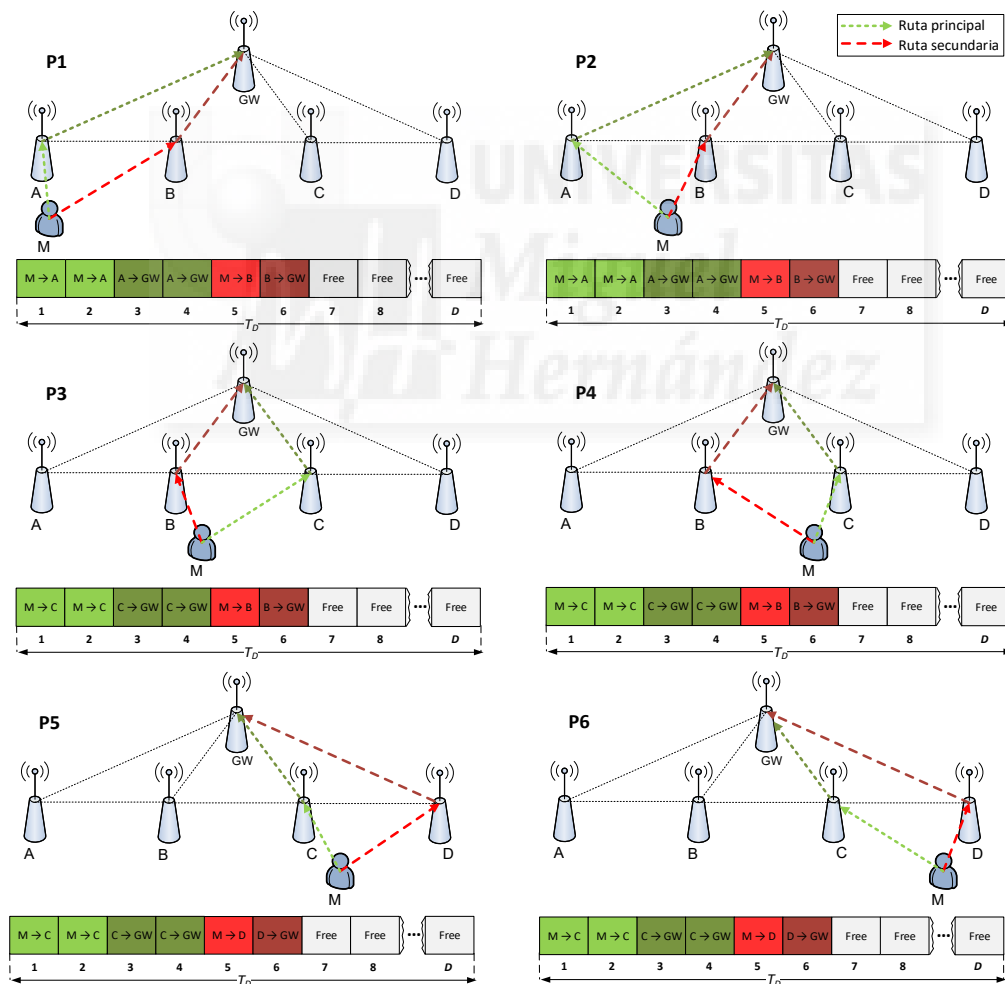


Figura 6-14. Asignación de rutas y enlaces de comunicación realizada por RLS para las diferentes posiciones del dispositivo M en el escenario de ejemplo.

*RLS2, Route and Link Selection for mobile IWSN with 2 links per hop*

Con RLS, es posible que en algunos instantes de tiempo la mejor ruta tenga asignada únicamente un enlace de comunicación por cada salto, mientras que la segunda mejor ruta tenga asignados dos. Esto implicaría obtener una fiabilidad *end-to-end* inferior a la que se obtendría cuando la mejor ruta tuviera asignados dos enlaces de comunicación por cada salto y la segunda mejor ruta tuviera asignados uno. Siempre que la fiabilidad *end-to-end* sea superior a la fiabilidad *end-to-end* objetivo en todo instante, este hecho no resultaría crítico. Aun así, se propone la técnica RLS2 (*Route and Link Selection for mobile IWSN with 2 links per hop*) para intentar mejorar la fiabilidad de RLS. RLS2 propone, al igual que RLS, que el *Network Manager* solo cambie la ruta principal o la ruta secundaria en el caso de que se estime que la fiabilidad *end-to-end* conjunta de ambas rutas vaya a ser inferior a la fiabilidad *end-to-end* objetivo de la aplicación. Sin embargo, a diferencia de RLS, RLS2 propone asignar 2 enlaces de comunicación a cada salto, tanto en la ruta principal como en la ruta secundaria. De esta forma, tal y como se muestra en la Figura 6-15 para el ejemplo planteado, en todo instante la mejor ruta tiene asignados dos enlaces de comunicación por cada salto, a la vez que se evitan las reasignaciones de rutas *HARD*. Con RLS2, en el ejemplo planteado en el que un dispositivo móvil se desplaza en línea recta desde P1 hasta P6, el *Network Manager* realizaría una primera asignación de rutas y enlaces de comunicación, y posteriormente realizaría únicamente dos reasignaciones de rutas *SOFT*.

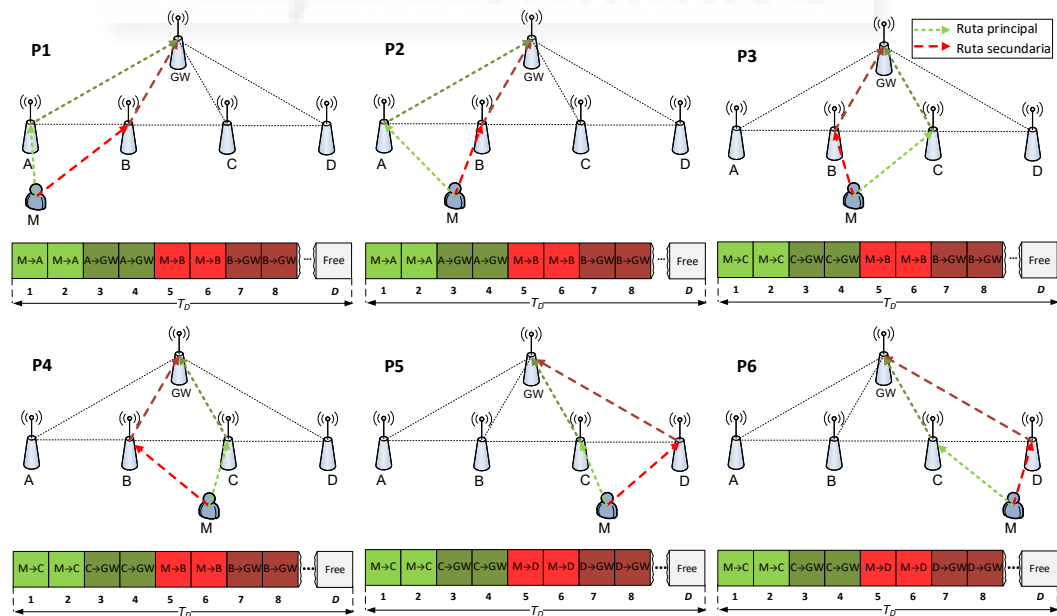


Figura 6-15. Asignación de rutas y enlaces de comunicación realizada por RLS2 para las diferentes posiciones del dispositivo M en el escenario de ejemplo.

*RLSS, Route and Link selection for mobile IWSN with Shared links*

RLS2 implica asignar dos enlaces de comunicación por cada salto, tanto de la ruta principal como de la ruta secundaria. Esto se traduce en dedicar más enlaces de comunicación de los que se dedican con WH-RLS y RLS (Figura 6-16). Con el objetivo de mantener dos enlaces de comunicación por cada salto de la ruta principal y la ruta secundaria, a la vez que se reduce el número de enlaces de comunicación dedicados a la transmisión de un paquete entre origen y destino, se propone RLSS (*Route and Link Selection for mobile IWSN with Shared links*). Al igual que RLS2, RLSS solo cambia la ruta principal o la ruta secundaria en el caso de que se estime que la fiabilidad *end-to-end* conjunta de ambas rutas vaya a ser inferior a la fiabilidad *end-to-end* objetivo requerida por la aplicación soportada. Sin embargo, RLSS propone utilizar el mismo enlace de comunicación (mismo recurso radio) para las dos transmisiones del primer salto desde el dispositivo móvil. Así, tanto el dispositivo estático retransmisor de la ruta principal, como el dispositivo estático retransmisor de la ruta secundaria han de estar a la escucha de la transmisión del dispositivo móvil en el mismo enlace de comunicación. De esta forma, RLSS explota la diversidad espacial ofrecida por los dos nodos estáticos en un mismo instante de tiempo. Tal y como se muestra en la Figura 6-17, en todo instante ambas rutas tienen asignados dos enlaces de comunicación por cada salto a la vez que se reduce el número de enlaces de comunicación dedicados con respecto a RLS2. Es importante resaltar que RLSS requiere que dos dispositivos estén a la escucha de una transmisión, algo que si bien en la versión actual del estándar WirelessHART no está contemplado, estudios como [62] y [63] han demostrado su utilidad en redes inalámbricas industriales. Para la evaluación de RLSS se ha considerado que el dispositivo móvil es capaz de recibir un ACK únicamente del dispositivo que actúa como retransmisor de la ruta principal, de modo que en base a este ACK determina si lo ha de retransmitir o no en el segundo enlace de comunicación asignado al primer salto del paquete. En caso de que el dispositivo que actúa como retransmisor de la ruta secundaria reciba el paquete de datos, lo retransmite hasta el GW<sup>27</sup>. Con RLSS, en el ejemplo planteado en el que un dispositivo móvil se desplaza en línea recta desde P1 hasta P6, el *Network Manager* realizaría una primera asignación de rutas y enlaces de

---

<sup>27</sup> Otras técnicas son también posibles cuando se utiliza el mismo recurso radio para la transmisión a dos dispositivos. Por ejemplo, podría considerarse la posibilidad de modificar la estructura de *slot* empleado en WirelessHART para permitir el envío de ACKs por parte de dos dispositivos. El dispositivo que actúa como retransmisor de la ruta secundaria también podría escuchar el ACK o la transmisión del dispositivo que actúa como retransmisor de la ruta principal para determinar si ha de retransmitir el paquete hasta el siguiente salto por la ruta secundaria.

comunicación, y posteriormente realizaría únicamente dos reasignaciones de rutas *SOFT*.

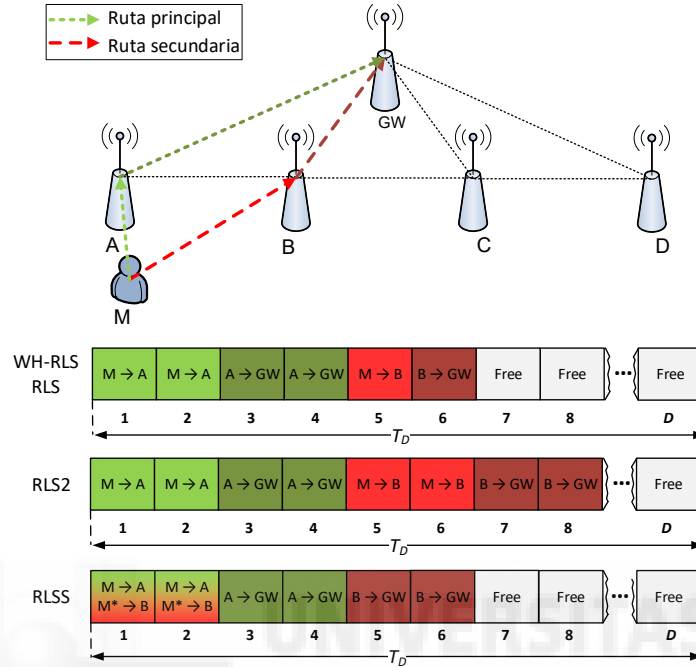


Figura 6-16. Asignación de rutas y enlaces de comunicación realizada por WH-RLS, RLS, RLS2 y RLSS para el dispositivo M en un escenario de ejemplo.

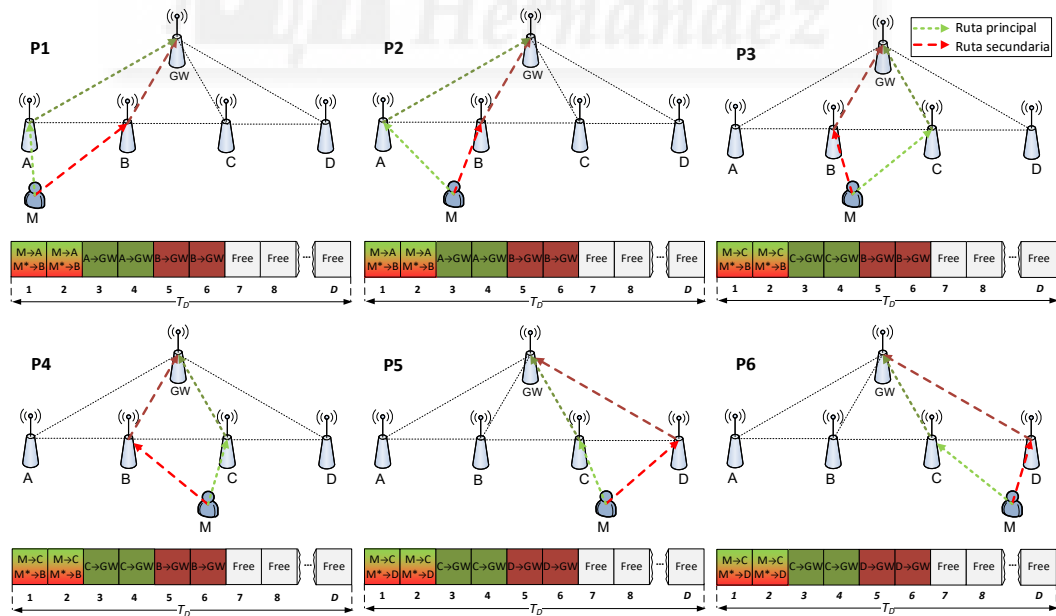


Figura 6-17. Asignación de rutas y enlaces de comunicación realizada por RLSS para las diferentes posiciones del dispositivo M en el escenario 1.

### 6.3.3 Escenario y condiciones de evaluación

#### Escenario

Los escenarios considerados para la evaluación de las diferentes propuestas están formados por un *Gateway* y 4, 7 o 10 dispositivos estáticos retransmisores desplegados según se presenta en la Figura 6-18, y un dispositivo móvil que se desplaza por el escenario. Los dispositivos estáticos están separados una distancia  $d_{opt}$  obtenida según el análisis realizado en el apartado 6.2. Cuatro valores de fiabilidad *end-to-end* objetivo han sido consideradas para este estudio (0.999, 0.99, 0.95 y 0.9) por lo que cuatro separaciones entre los dispositivos estáticos ( $d_{opt}$ ) han sido utilizadas (40m, 70m, 116m y 152m). Los escenarios han sido seleccionados por ser escenarios en los que se producen un alto número de reasignaciones para garantizar una fiabilidad *end-to-end* objetivo a medida que el dispositivo móvil se desplaza.

El dispositivo móvil se desplaza utilizando el modelo de movilidad RWP, cuya explicación fue detallada en el apartado 3.2.1. En los escenarios utilizados, el dispositivo móvil se desplaza dentro de un área rectangular (sombreado en la Figura 6-18), cuyas dimensiones dependen del escenario y la correspondiente separación entre los dispositivos ( $d_{opt}$ ). El dispositivo móvil se desplaza a una velocidad de entre 0.5m/s y 5m/s, escogiéndose ésta aleatoriamente de nuevo tras alcanzar la posición marcada por el modelo de movilidad RWP. Durante el desplazamiento del dispositivo móvil, el *Network Manager* asigna las rutas y los enlaces de comunicación de acuerdo a la técnica evaluada (WH-RLS, RLS, RLS2 y RLSS), escogiendo siempre como primer salto uno de los dispositivos estáticos desplegados.

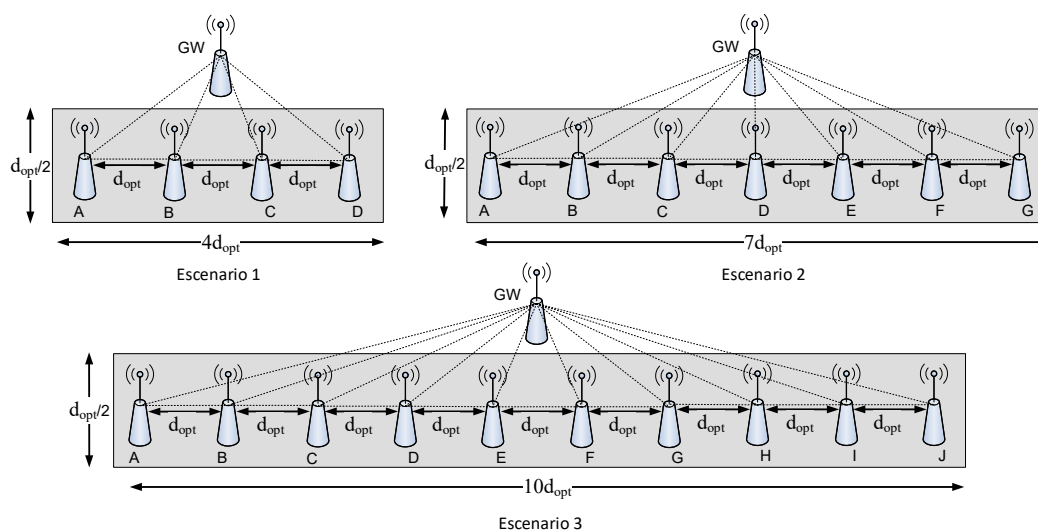


Figura 6-18. Despliegues de dispositivos estáticos y área de desplazamiento del dispositivo móvil.



Los paquetes de datos generados por el dispositivo móvil son de 133 Bytes. La frecuencia de generación de dichos paquetes es de un paquete por segundo, de forma que el *Network Manager* tiene que realizar la asignación de enlaces de comunicación para la transmisión de los paquetes de datos dentro de una supertrama de 1 segundo de duración ( $T_D=1$  segundo). El dispositivo identificado como GW actúa como *Gateway* de los paquetes de datos generados por el dispositivo móvil e incorpora las funciones del *Network Manager*. En este estudio, al igual que en el presentado en el apartado 3.2, se ha considerado que el *Network Manager* tiene en todo momento conocimiento de la calidad de los enlaces de comunicación entre todos los dispositivos de la red<sup>28</sup>, y que los cambios de asignaciones de rutas y enlaces de comunicación son distribuidos a todos los dispositivos de la red sin errores en un tiempo despreciable. La duración de cada una de las pruebas simuladas es de una semana, lo que con una periodicidad de envío de datos ( $T_D$ ) de un segundo, equivale a 604800 transmisiones de datos entre el dispositivo evaluado y el dispositivo que actúa como *Gateway*.

#### Modelo de propagación

Para la comunicación entre el dispositivo móvil y los dispositivos retransmisores estáticos se ha considerado el modelo de canal radio que modela de forma logarítmica las pérdidas de propagación con la distancia entre el transmisor y el receptor, y modela el efecto producido por la presencia de obstáculos (*shadowing*) mediante una distribución aleatoria log-normal [25] (apartado 3.2.1). El modelo de propagación radio empleado hace uso de los valores de  $PL(15m)=71.84\text{dB}$ ,  $n=2.16$  y  $\sigma=8.13$  obtenidos en [26] al considerar de forma conjunta las diferentes condiciones de propagación en un escenario industrial (*All topographies*).

En la evaluación realizada se ha considerado la transmisión de paquetes con una potencia de transmisión ( $P_{Tx}$ ) de 3 dBm en presencia de una potencia de ruido de  $N=-90\text{dbm}$ , lo cual resulta en la PDR mostrada en la Figura 6-19 en función de la distancia entre el transmisor y el receptor. Para la comunicación entre los dispositivos estáticos retransmisores y el *Gateway* se han diferenciado tres situaciones: una primera situación en la que no se consideran errores en la transmisión, esto es,  $PDR_{F-GW}=1$ ; una segunda situación con una  $PDR_{F-GW}=0.999$ ; y una tercera situación con una  $PDR_{F-GW}=0.99$ .

---

<sup>28</sup> Si no fuera el caso, el *Network Manager* debería emplear los *Health Reports* reportados por los dispositivos de la red.

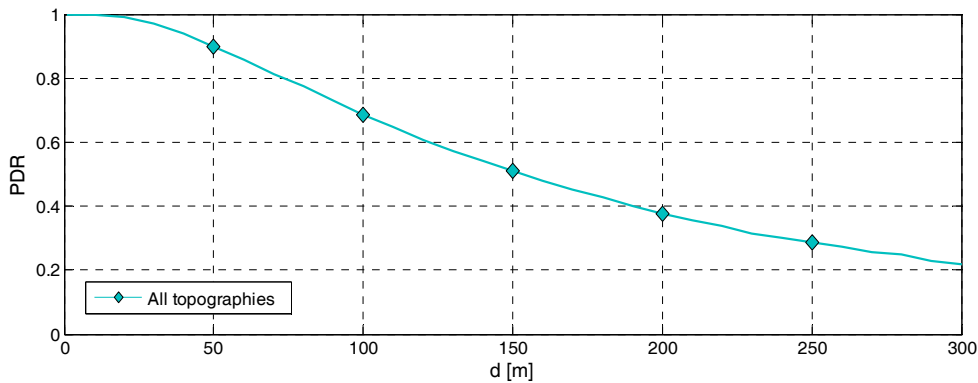


Figura 6-19. PDR en función de la distancia entre el emisor y el receptor para el caso *All topographies* cuando  $P_{Tx}=3$  dBm,  $N=-90$  dBm y  $B=133$  bytes.

### Métricas

El estudio considera en primer lugar tres métricas relacionadas con el número de reasignaciones realizadas por el *Network Manager*: número de reasignaciones de rutas *SOFT*, *HARD* y *SOFT+HARD*. En este estudio se define como métrica el ratio del número de reasignaciones realizadas con cada técnica con respecto a las reasignaciones realizadas con la técnica de referencia (WH-LRA).

Este estudio considera también como métrica de rendimiento el número de enlaces de comunicación que son asignados por cada técnica. Esta métrica es importante cuando se requieren acomodar gran cantidad de flujos de datos de diferentes dispositivos, ya que cuantos menos recursos sean necesarios por cada flujo de datos, más flujos de datos podrán ser asignados en una red. En el escenario considerado, en el que el dispositivo móvil permanece en todo instante al mismo número de saltos del GW (2), los enlaces de comunicación necesarios por cada técnica se mantiene constantes. Así, mientras que en las técnicas WH-RLS, RLS y RLSS son necesarios 6 enlaces de comunicación por cada transmisión en el escenario de ejemplo mostrado en la Figura 6-16, en la técnica RLS2 son necesarios 8 enlaces de comunicación.

Este estudio utiliza también dos métricas relacionadas con la fiabilidad *end-to-end* de las transmisiones entre origen y destino del dispositivo evaluado. De forma general, la fiabilidad *end-to-end* puede ser estimada como:

$$Fiabilidad_{end-to-end} = \left( \prod_{h_p=1}^{H_p} \left( 1 - (1 - PDR_{h_p})^{L_p} \right) \right) + \left( (1 - PDR_1)^{L_p} \prod_{h_s=1}^{H_s} \left( 1 - (1 - PDR_{h_s})^{L_s} \right) \right) \quad (6-9)$$

donde  $H_p$  y  $H_s$  representan el número de saltos en la ruta principal y secundaria,  $L_p$  y  $L_s$  el número de enlaces de comunicación asignados en cada salto de la ruta principal y secundaria, y  $PDR_{h_p}$  y  $PDR_{h_s}$  la  $PDR$  del salto  $h_p$  y  $h_s$ . En concreto, se define como métrica el valor promedio de la fiabilidad *end-to-end* obtenida durante el desplazamiento del dispositivo en cada una de las pruebas. Así, se define la fiabilidad *end-to-end* promedio, como el promedio de la probabilidad de que los paquetes originados por el dispositivo evaluado sean correctamente recibidos por el dispositivo destino en cada una de las pruebas, cuando se emplean las rutas y los enlaces de comunicación establecidos por el *Network Manager*. Por otro lado, se ha considerado como métrica el valor mínimo de la fiabilidad *end-to-end* obtenida durante el desplazamiento del dispositivo móvil en cada una de las pruebas. Así, se define la fiabilidad *end-to-end* mínima como el valor mínimo de la fiabilidad *end-to-end* que el dispositivo móvil experimenta cuando se emplean las rutas y los enlaces de comunicación establecidos por el *Network Manager*. Mientras que la fiabilidad *end-to-end* mínima permite comprobar que en todo instante se obtiene una fiabilidad *end-to-end* superior a la fiabilidad *end-to-end* objetivo, la fiabilidad *end-to-end* promedio permite obtener una medida de la calidad media de las transmisiones del dispositivo evaluado.

Finalmente, también se ha considerado como métrica del rendimiento el retardo *end-to-end* promedio de los paquetes correctamente entregados al destino. Esta métrica representa el valor promedio del retardo *end-to-end* que las transmisiones de datos del dispositivo móvil experimentan durante su desplazamiento. Al igual que la fiabilidad *end-to-end* promedio, un retardo *end-to-end* promedio inferior es beneficioso, si bien no es determinante siempre que los enlaces de comunicación estén asignados de forma consecutiva y por tanto se eviten esperas innecesarias en la retransmisión del paquete de datos hasta el destino.

#### 6.3.4 Resultados

La Figura 6-20 compara el rendimiento obtenido por las técnicas WH-RLS, RLS, RLS2 y RLSS para cuatro valores de fiabilidad *end-to-end* objetivo (0.999, 0.99, 0.95 y 0.90) bajo el escenario 2 (escenario compuesto por 7 dispositivos estáticos) cuando la  $PDR$  de los enlaces entre los dispositivos estáticos y el *Gateway* ( $PDR_{F-GW}$ ) es de 0.999. Los resultados obtenidos muestran en primer lugar, que las técnicas propuestas evitan completamente las reasignaciones *HARD* en comparación con la técnica WH-RLS (Figura 6-20a). Además, la técnica RLS reduce entre un 40% y un 50% las reasignaciones *SOFT* con respecto a WH-RLS. Las técnicas RLS2 y RLSS reducen entre un 50% y un 70% las

reasignaciones *SOFT* con respecto a WH-RLS (Figura 6-20b). Cuando se comparan las reasignaciones totales (*SOFT+HARD*) realizadas por las técnicas propuestas (Figura 6-20c), se aprecia la importante reducción de reasignaciones obtenida, lo que en la práctica supondría la necesidad de utilizar un menor número de enlaces de comunicación para la gestión de las transmisiones del dispositivo móvil, y por tanto para la gestión de la red. Estos resultados se producen debido a que las técnicas propuestas solo desencadenan una reasignación de rutas *SOFT* en caso de que se estime que la fiabilidad actual es menor a la fiabilidad determinada por la aplicación. Los resultados obtenidos muestran además que la reducción del número de reasignaciones es mayor cuanto mayor es la fiabilidad *end-to-end* objetivo. Esto es así porque a mayor fiabilidad *end-to-end* objetivo, menor separación entre los dispositivos estáticos y por tanto mayor cantidad de reasignaciones se realizan por unidad de tiempo.

El análisis de la fiabilidad demuestra que todas las técnicas proporcionan una fiabilidad *end-to-end* mínima superior a la objetivo (Figura 6-20d), por lo que se cumplen en todo instante los requisitos de fiabilidad *end-to-end* demandados por la aplicación. Por otro lado, es de destacar que lógicamente, la fiabilidad *end-to-end* mínima obtenida por WH-RLS es superior a la obtenida por el resto de técnicas. Este hecho es debido a que en la técnica WH-RLS, el *Network Manager* está continuamente escogiendo las rutas con mayor fiabilidad *end-to-end*. En cuanto a la fiabilidad *end-to-end* promedio y al retardo *end-to-end* promedio, los resultados obtenidos por las técnicas propuestas presentan un rendimiento ligeramente inferior al proporcionado por WH-RLS. En este sentido, cabe destacar por un lado que la fiabilidad *end-to-end* promedio de las técnicas propuestas se reduce al reducirse la fiabilidad *end-to-end* objetivo como consecuencia de que con las técnicas propuestas se realiza la reasignación de rutas y enlaces de comunicación a un valor más bajo de fiabilidad *end-to-end*, aunque siempre por encima del valor objetivo. Por otro lado, las técnicas RLS2 y RLSS presentan una fiabilidad *end-to-end* promedio ligeramente superior a la obtenida por RLS. Además, RLSS obtiene una fiabilidad *end-to-end* promedio similar a RLS2, pero con un menor retardo *end-to-end* promedio de los paquetes y dedicando un menor número de enlaces de comunicación. Este menor retardo de RLSS es consecuencia de que, a diferencia de RLS2, el dispositivo retransmisor de la ruta secundaria no ha de esperar su recepción cuando fallan las dos transmisiones correspondientes al primer salto de la ruta principal. En cualquier caso, el aumento del retardo con las técnicas RLS y RLSS con respecto a WH-RLS es inferior al 9.5% y al 11.2%, respectivamente. El aumento del retardo con la técnica RLS2 alcanza el 23.4% como consecuencia de que, tal y como se presenta en la Figura 6-16, el paquete no es reenviado al *Gateway* por la ruta secundaria hasta el séptimo *slot*.

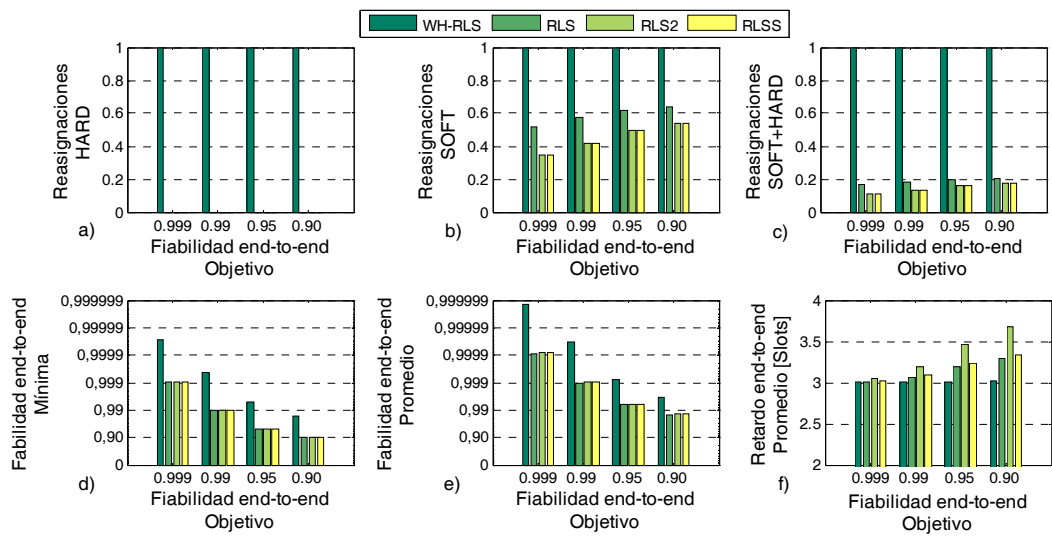


Figura 6-20. Comparación del rendimiento obtenido por las técnicas WH-RLS, RLS, RLS2 y RLSS bajo el escenario 2 con  $PDR_{F-GW}$  igual a 0.999.

Las mismas tendencias son obtenidas para el número de reasignaciones, la fiabilidad *end-to-end* y el retardo *end-to-end* cuando se evalúan otros escenarios u otros valores de PDR de los enlaces de comunicación entre los dispositivos estáticos y el *Gateway* ( $PDR_{F-GW}$ ). Por ejemplo, los resultados presentados en la Figura 6-21, muestran la comparación del rendimiento obtenido por las técnicas WH-RLS, RLS, RLS2 y RLSS bajo el escenario 3 (escenario compuesto por 10 dispositivos estáticos) cuando la PDR de los enlaces de comunicación entre los dispositivos estáticos y el *Gateway* ( $PDR_{F-GW}$ ) se mantiene en 0.999. El aumento del número de dispositivos estáticos hace que el número de reasignaciones se incremente en mayor medida en las técnicas propuestas que en la técnica WH-RLS, y que por tanto se reduzca la diferencia entre las técnicas propuestas y WH-RLS, tal y como se muestra en la Figura 6-21c. Sin embargo, tal y como se muestra en la Figura 6-21e, la fiabilidad *end-to-end* en este tercer escenario se mantiene en los mismos valores que los resultados presentados en el escenario 2 (Figura 6-20d). Por otro lado, los resultados presentados en la Figura 6-22, muestran la comparación del rendimiento obtenido por las técnicas WH-RLS, RLS, RLS2 y RLSS bajo el escenario 3 (escenario compuesto por 10 dispositivos estáticos) cuando la PDR de los enlaces de comunicación entre los dispositivos estáticos y el *Gateway* ( $PDR_{F-GW}$ ) se reduce a 0.99. La reducción de la PDR de los enlaces de comunicación entre los dispositivos estáticos y el *Gateway* ( $PDR_{F-GW}$ ) hace que el número de reasignaciones prácticamente no varíe (Figura 6-22b y Figura 6-22c). Sin embargo, sí se aprecia una reducción de la fiabilidad *end-to-end* al reducir  $PDR_{F-GW}$ , especialmente significativa para el caso de WH-RLS cuando se requiere una fiabilidad *end-to-end* de 0.999 y 0.99 (Figura 6-22e).

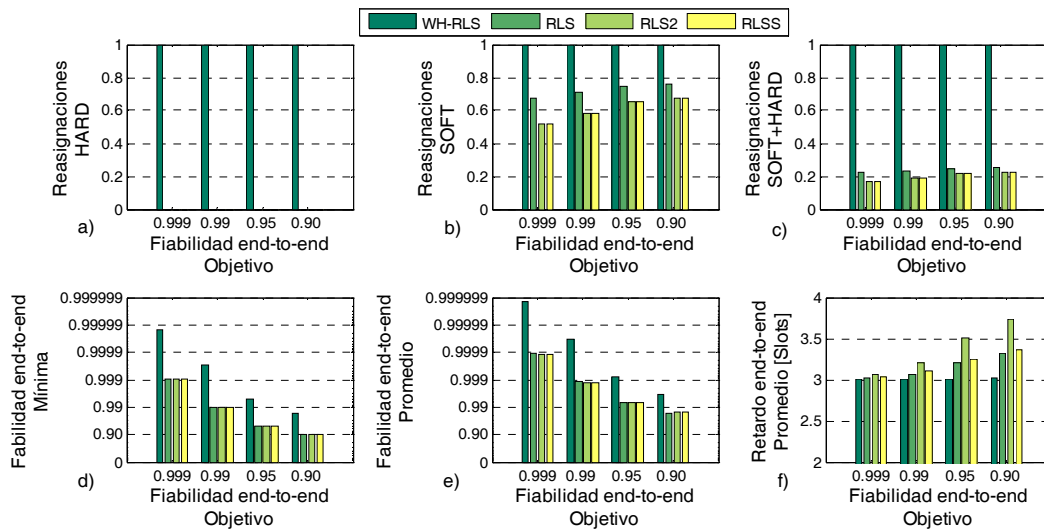


Figura 6-21. Comparación del rendimiento obtenido por las técnicas WH-RLS, RLS, RLS2 y RLSS bajo el escenario 3 con  $PDR_{F-GW}$  igual a 0.999.

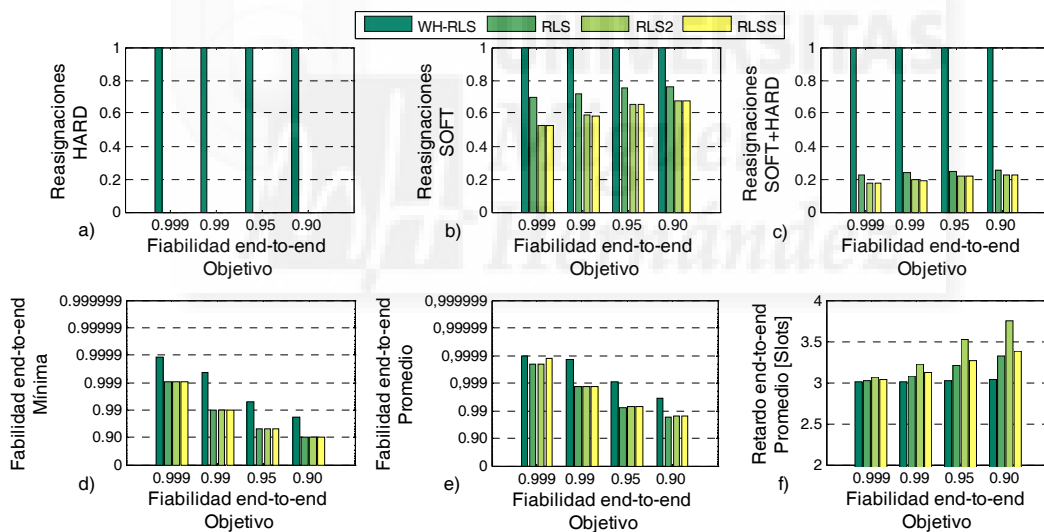


Figura 6-22. Comparación del rendimiento obtenido por las técnicas WH-RLS, RLS, RLS2 y RLSS bajo el escenario 3 con  $PDR_{F-GW}$  igual a 0.99.

Los resultados presentados en la Figura 6-21 y la Figura 6-22 presentan diferencias en cuanto al número de reasignaciones realizadas por las técnicas propuestas en comparación con WH-RLS debido al cambio de las condiciones de evaluación (escenario y  $PDR_{F-GW}$ ). En este sentido, resulta interesante mostrar por separado la dependencia del número de reasignaciones realizadas por las técnicas propuestas con el escenario escogido y con la calidad de los enlaces de comunicación entre los dispositivos estáticos

y el *Gateway* ( $PDR_{F-GW}$ ). Por un lado, la Figura 6-23 presenta la comparación del número de reasignaciones realizadas por las técnicas WH-RLS, RLS, RLS2 y RLSS en función de los diferentes  $PDR_{F-GW}$  evaluados bajo el escenario 2. Los resultados obtenidos muestran que no hay prácticamente dependencia de la calidad de los enlaces de comunicación entre los dispositivos estáticos y el *Gateway* ( $PDR_{F-GW}$ ) con el número de reasignaciones en las distintas técnicas evaluadas. A priori esto parece algo lógico, puesto que la reasignaciones de rutas y enlaces de comunicación están ocasionadas por la variación de la calidad del enlace de comunicación entre el dispositivo móvil evaluado y el primer dispositivo estático retransmisor. Por otro lado, la Figura 6-24 presenta la comparación del número de reasignaciones realizadas por las técnicas WH-RLS, RLS, RLS2 y RLSS en función del escenario considerado cuando se considera una  $PDR_{F-GW}$  de 0.99. Los resultados obtenidos en este segundo caso muestran que sí hay dependencia entre la reducción del número de reasignaciones obtenida con las técnicas propuestas y el escenario considerado. Finalmente, la Figura 6-25 compara el número total de reasignaciones realizadas por las técnicas WH-RLS, RLS, RLS2 y RLSS en función del número de dispositivos estáticos desplegados para una  $PDR_{F-GW}$  de 0.99. Para poder comparar la influencia del número de dispositivos desplegados en el número total de reasignaciones realizadas por las diferentes técnicas, la Figura 6-25 considera además los casos en que se despliegan 13, 16 y 19 dispositivos estáticos separados una distancia óptima<sup>29</sup>. Los resultados obtenidos muestran una menor reducción del número de reasignaciones realizadas por las técnicas propuestas en escenarios con mayor número de dispositivos estáticos desplegados. Este hecho podría estar motivado por el hecho de que al aumentar el área de desplazamiento del dispositivo móvil<sup>30</sup>, más cambios de rutas y asignaciones de enlaces de comunicación son necesarios para mantener la fiabilidad *end-to-end* objetivo. Sin embargo, los resultados obtenidos muestran que en WH-RLS el número de reasignaciones prácticamente no depende del escenario considerado, puesto que WH-RLS asigna en todo instante las dos mejores rutas. En este sentido, la Figura 6-25 muestra cómo el incremento del número de reasignaciones realizadas por las técnicas propuestas, que se observa al aumentar el número de dispositivos estáticos desplegados, se contiene a partir de 10 dispositivos estáticos desplegados, especialmente cuando se compara el número total de reasignaciones (*SOFT+HARD*).

---

<sup>29</sup> El despliegue de 13, 16 y 19 dispositivos estáticos separados la distancia óptima está basado en los mismos principios utilizados en los escenarios presentados en la Figura 6-18.

<sup>30</sup> El área de desplazamiento del dispositivo móvil es proporcional al número de dispositivos estáticos desplegados, ya que éstos están ubicados en línea separados la distancia óptima determinada, tal y como se presenta en la Figura 6-18.

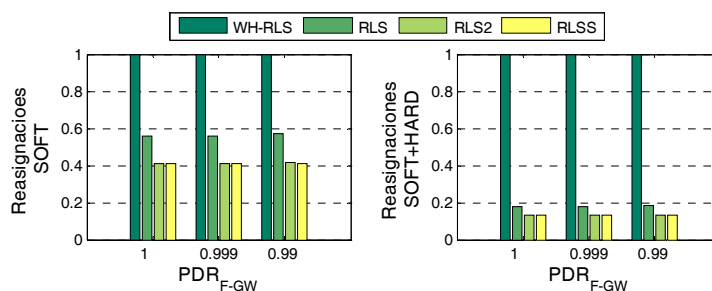


Figura 6-23. Comparación del número de reasignaciones realizadas por las técnicas WH-RLS, RLS, RLS2 y RLSS en función de  $PDR_{F-GW}$  bajo el escenario 2.

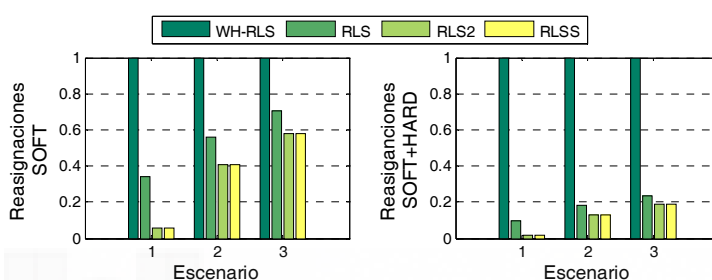


Figura 6-24. Comparación del número de reasignaciones realizadas por las técnicas WH-RLS, RLS, RLS2 y RLSS en función del escenario considerado con  $PDR_{F-GW}$  igual a 0.99.

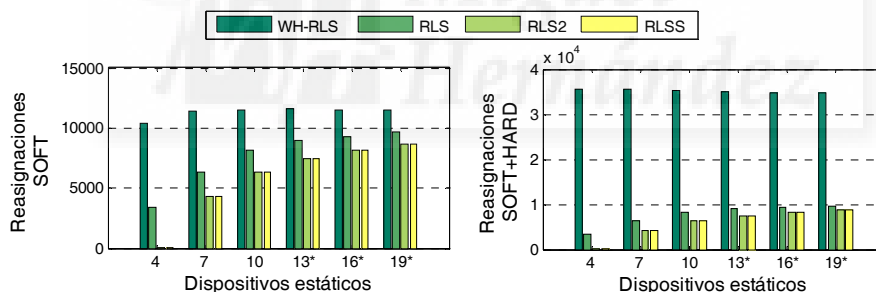


Figura 6-25. Comparación del número total de reasignaciones realizadas por las técnicas WH-RLS, RLS, RLS2 y RLSS en función del número de dispositivos estáticos desplegados con  $PDR_{F-GW}$  igual a 0.99.

A modo de resumen, las técnicas propuestas para la reasignación de rutas y enlaces de comunicación (RLS, RLS2 y RLSS) son capaces de reducir notablemente el número de reasignaciones realizadas en movilidad cuando se requiere garantizar un nivel de fiabilidad *end-to-end* objetivo en las transmisiones de datos por parte de dispositivos móviles. El estudio realizado ha puesto de manifiesto también que las técnicas propuestas pueden garantizar un nivel de fiabilidad *end-to-end* objetivo cambiando únicamente una de las rutas y sin necesidad de intercambiar la ruta principal por la



secundaria, es decir, sin realizar reasignaciones *HARD*. Además, las técnicas propuestas también son capaces de garantizar un nivel de fiabilidad *end-to-end* objetivo a la vez que se reducen el número de reasignaciones *SOFT* con respecto a WH-RLS. Es importante resaltar que esta reducción supone liberar enlaces de comunicación dedicados a la gestión de los cambios en las rutas y enlaces de comunicación. Sin embargo, RLS reduce el número de reasignaciones a costa de empeorar ligeramente la fiabilidad *end-to-end* promedio y el retardo *end-to-end* promedio, aunque siempre se garantizan niveles por encima de los valores objetivo. Es también importante destacar que RLSS consigue obtener una fiabilidad *end-to-end* promedio similar a RLS2 empleando menos enlaces de comunicación y con un menor retardo *end-to-end* promedio de los paquetes.

## 6.4 Conclusiones

Este capítulo ha abordado de forma conjunta la selección de rutas y la asignación de enlaces de comunicación para transmisiones desde dispositivos móviles. En concreto, se han realizado diferentes propuestas con el objetivo de reducir el número de reasignaciones que se han de realizar cuando se requiere garantizar un nivel de fiabilidad objetivo en las transmisiones de datos por parte de dispositivos móviles. En primer lugar, se ha estudiado qué dispositivos ha de escoger el *Network Manager* en cada proceso de reasignación de rutas y enlaces de comunicación como primer salto desde un dispositivo móvil para maximizar el área en la que se proporciona una fiabilidad *end-to-end* superior a la fiabilidad demandada por la aplicación industrial. Maximizar dicha área reduce el número de reasignaciones de rutas y enlaces necesarios. El estudio llevado a cabo ha demostrado que existe una separación óptima entre los dispositivos utilizados como primer salto que maximiza el área sobre la que se garantiza un nivel de fiabilidad superior a la objetivo para las comunicaciones desde dispositivos móviles. Sin embargo, la identificación de la separación óptima entre los dispositivos retransmisores escogidos como primer salto de la ruta requiere de una evaluación numérica que tiene un impacto sobre el coste computacional. Con el fin de reducir dicho coste, se ha propuesto una alternativa para identificar la separación entre los dispositivos retransmisores. Esta alternativa consigue una buena aproximación del área de cobertura con respecto al caso en que se identifica la separación óptima. Utilizando los resultados previos, el capítulo también ha analizado la localización de los dispositivos retransmisores cuando se dispone de información de la movilidad del dispositivo, y cuando no se dispone de dicha información.

Tras identificar la separación óptima a la que deberían encontrarse los dispositivos retransmisores estáticos para reducir el número de reasignaciones de rutas y enlaces en transmisiones desde/hacia dispositivos móviles, se han propuesto, evaluado y comparado tres alternativas para la reasignación de rutas y enlaces de comunicación. El objetivo de estas propuestas es el de reducir el número de reasignaciones que se han de realizar durante el desplazamiento de un dispositivo móvil a la vez que se mantiene una fiabilidad *end-to-end* por encima de una fiabilidad objetivo. La propuesta RLS (*Route and Link Selection for mobile IWSN*) evita las reasignaciones de rutas *HARD*, y busca reducir el número de reasignaciones de rutas *SOFT* ocasionadas por el desplazamiento de los dispositivos móviles. Los resultados obtenidos han demostrado que RLS consigue reducir el número de reasignaciones en escenarios en los que los dispositivos estáticos se encuentran separados la distancia óptima previamente identificada. Además, RLS consigue garantizar un nivel de fiabilidad *end-to-end* objetivo, aunque empeora ligeramente la fiabilidad *end-to-end* promedio y el retardo *end-to-end* promedio. Las técnicas RLS2 (*Route and Link Selection for mobile IWSN with 2 links per hop*) y RLSS (*Route and Link Selection for mobile IWSN with Shared links*) consiguen mejorar la fiabilidad *end-to-end* promedio y el retardo *end-to-end* promedio con respecto a RLS a la vez que reducen el número de reasignaciones necesarios con el estándar WirelessHART. Es también importante destacar que RLSS obtiene una fiabilidad *end-to-end* promedio similar a RLS2 empleando menos enlaces de comunicación y con un menor retardo *end-to-end* promedio de los paquetes.

# 7

## Conclusiones

Las redes inalámbricas industriales están llamadas a ser uno de los pilares tecnológicos fundamentales de la Industria 4.0. Estas redes están expresamente desarrolladas para operar en condiciones de comunicación adversas, como las que pueden caracterizar los entornos industriales, y para proporcionar elevados niveles de fiabilidad y baja latencia en las comunicaciones. Sin embargo, el completo desarrollo de los sistemas industriales cooperativos y cognitivos necesarios para la Industria 4.0 requiere que las redes inalámbricas industriales puedan soportar la movilidad de todos o ciertos dispositivos. La capacidad de soportar dicha movilidad no fue tenida en cuenta para el desarrollo de los actuales estándares de comunicaciones inalámbricas industriales. En este contexto, el objetivo principal de la presente tesis doctoral ha sido el diseño y evaluación de protocolos de comunicación para mejorar el funcionamiento de las redes inalámbricas industriales en presencia de dispositivos móviles. Para abordar el problema, en primer lugar se ha evaluado el impacto que supone el despliegue de dispositivos con movilidad en el funcionamiento y rendimiento de los actuales estándares de comunicaciones inalámbricas industriales. Esta evaluación ha permitido identificar tres posibles líneas de investigación necesarias para mejorar el rendimiento de las comunicaciones inalámbricas industriales cuando se requiere incorporar dispositivos con movilidad. En el marco de la presente tesis doctoral se han abordado investigaciones en las dos líneas consideradas de mayor impacto y recorrido: la

detección de dispositivos vecinos en presencia de dispositivos móviles, y la gestión dinámica de los enlaces de comunicación y las rutas multi-salto características de las comunicaciones industriales. Los siguientes apartados proporcionan un completo resumen de los principales resultados y conclusiones derivadas de las investigaciones realizadas en esta tesis, para finalmente discutir posibles líneas futuras de investigación.

## 7.1 Impacto de la movilidad en redes inalámbricas industriales

Los análisis del impacto de la movilidad en el funcionamiento y rendimiento de las redes inalámbricas industriales presentados en el capítulo 3 han demostrado que los actuales estándares inalámbricos industriales en general, y el estándar WirelessHART en particular, no son capaces de soportar de forma eficiente la movilidad de los dispositivos a la vez que se garantiza la fiabilidad de las comunicaciones. Un primer análisis ha demostrado, que incluso en escenarios relativamente pequeños, los mecanismos de gestión presentes en WirelessHART no son adecuados para gestionar de un modo eficiente la movilidad de los dispositivos de la red, y resultan en una ineficiente utilización del canal radio y en una degradación del rendimiento *end-to-end*. A pesar de que la investigación realizada ha permitido detectar valores óptimos en la configuración de las redes WirelessHART cuando éstas integran dispositivos móviles, los niveles de rendimiento obtenidos siguen siendo insuficientes. Un segundo análisis ha demostrado que el empleo de tiempos de reconfiguración mayores a la periodicidad del envío de los paquetes de datos, hecho que se da en WirelessHART, resulta en una considerable reducción de la fiabilidad *end-to-end* al no poder modificar hasta el siguiente periodo de reconfiguración la ruta cuando los dispositivos móviles pierden la conexión con sus vecinos. Este segundo estudio ha puesto de manifiesto que la reducción de la fiabilidad *end-to-end* en el caso de dispositivos móviles depende además del intervalo de reconfiguración, de factores como la velocidad del dispositivo, la separación entre los dispositivos estáticos, el algoritmo de asignación de rutas y enlaces de comunicación, o las condiciones de propagación radio. Los resultados obtenidos en estos estudios han permitido identificar los principales retos y líneas de investigación que han de ser abordados a nivel de capa de enlace y de red para proporcionar a los dispositivos móviles una transmisión *end-to-end* fiable y con bajo retardo. En concreto, tres retos o líneas principales han sido identificados: el acceso de un dispositivo móvil a la red; la detección de nuevos vecinos móviles; y la gestión dinámica de las rutas y los enlaces de comunicación. De los tres retos identificados, la presente tesis ha abordado los dos retos

considerados de mayor impacto y recorrido, esto es, la detección de nuevos dispositivos vecinos y la gestión dinámica de los enlaces de comunicación y las rutas.

## 7.2 Descubrimiento de vecinos

Para solventar los problemas de WirelessHART en el proceso de descubrimiento de vecinos cuando algunos dispositivos son móviles, esta tesis ha propuesto, evaluado y comparado tres nuevos protocolos de descubrimiento de vecinos: LAN (*Listen Advertise Network*), LCA (*Listen for Close Advertises*), y LANm (*Listen Advertise Network for mobile devices*). Los protocolos propuestos aplican mecanismos deterministas para reducir el tiempo empleado en descubrir nuevos vecinos. Dos de los tres protocolos propuestos explotan información de la topología de la red y la naturaleza de los dispositivos (estáticos o móviles) para mejorar la eficiencia en cuanto a la utilización de los enlaces de comunicación y al consumo de energía. Los protocolos de descubrimiento de vecinos propuestos han sido evaluados mediante modelos analíticos (propuestos en esta tesis) y simulaciones con diferente número de dispositivos estáticos y móviles desplegados. Los resultados obtenidos demuestran que LAN es capaz de mejorar significativamente la capacidad de los dispositivos móviles de descubrir dispositivos vecinos, así como de reducir el número de veces que dispositivos móviles pierden la conectividad por no detectar a tiempo nuevos vecinos en comparación con la solución existente en WirelessHART. Gracias a que en LCA cada dispositivo solo intenta recibir *Advertise* DLPDUs de sus vecinos de uno y dos saltos, LCA consigue un rendimiento similar a LAN pero con un menor consumo de energía y un menor *overhead* en las comunicaciones. LAN y LCA no diferencian entre dispositivos estáticos y dispositivos móviles. Por el contrario, LANm propone explotar esta diferenciación, y aplica la solución existente en WirelessHART a todos los dispositivos de la red, y LAN solo a los dispositivos móviles. Esto permite obtener el mejor compromiso en cuanto a rendimiento, eficiencia y consumo de energía. Es de destacar que los protocolos propuestos requerirían mínimas modificaciones al estándar WirelessHART al estar basados en la escucha de *Advertise* DLPDUs. Estos mensajes ya existen en el estándar y son transmitidos por la red para permitir el acceso de nuevos dispositivos a la red. Además, los protocolos de descubrimiento de vecinos propuestos podrían ser también aplicables a ISA100.11a y a IEEE 802.15.4e al mantener un mecanismo de escucha pasiva en el descubrimiento de vecinos y al presentar un mecanismo de acceso de los dispositivos basado en el envío de paquetes de anuncio de la red.

### 7.3 Asignación de enlaces de comunicación

La presente tesis ha propuesto un nuevo algoritmo de asignación de enlaces de comunicación (*link scheduling*) para redes inalámbricas industriales basado en el concepto de testigo virtual (*virtual token*). El algoritmo propuesto, denominado LIKUID (*LIInK schedUlling scheme with shareD links and virtual tokens*), emplea enlaces de comunicación compartidos entre los dispositivos que forman una misma ruta para mejorar el rendimiento de las comunicaciones *end-to-end*. Gracias a que el mensaje actúa como testigo virtual, LIKUID es capaz de identificar de forma eficiente que dispositivo debe transmitir en cada instante sobre los enlaces de comunicación compartidos. De esta forma, se minimiza el retardo y se maximiza la fiabilidad en la entrega del mensaje dada una ruta predefinida entre un origen y un destino. La comparación entre LIKUID y los algoritmos de referencia existentes ha sido realizada tanto a través de un modelado analítico desarrollado en esta tesis, como mediante simulaciones que tienen en cuenta condiciones realistas de funcionamiento, incluyendo despliegues con dispositivos móviles. Los resultados obtenidos demuestran claramente que LIKUID mejora significativamente la fiabilidad y el retardo *end-to-end* con respecto a los algoritmos existentes cuando se utiliza el mismo número total de enlaces de comunicación asignados a una ruta completa. Además, esta tendencia ha demostrado ser independiente del número de saltos en la ruta, de las condiciones de la calidad de los enlaces de comunicación, y de la presencia de dispositivos móviles en la ruta. Los resultados obtenidos también han demostrado que es posible mejorar los niveles de fiabilidad que ofrecen los algoritmos existentes como HbH o RTE, a la vez que se reduce el número total de enlaces de comunicación asignados a una ruta completa. Los resultados obtenidos también han demostrado que LIKUID se adapta especialmente a los despliegues con dispositivos móviles gracias al aprovechamiento de los enlaces de comunicación asignados a las retransmisiones en el salto entre un dispositivo móvil y un dispositivo estático vecino.

### 7.4 Selección de rutas y asignación coordinada de enlaces de comunicación

El capítulo 6 profundiza en la asignación de enlaces de comunicación cuando se tienen en cuenta las rutas escogidas para las transmisiones desde los dispositivos móviles. Con el objetivo de reducir el número de reasignaciones que se han de realizar cuando se requiere garantizar un nivel de fiabilidad objetivo en las transmisiones de

datos por parte de dispositivos móviles, la tesis ha abordado de forma conjunta la selección de rutas y la asignación de enlaces de comunicación. Estas reasignaciones de rutas y enlaces de comunicación tienen lugar cuando alguno de los enlaces de comunicación de una ruta multi-salto se rompe al perder la conectividad los dos dispositivos que conformaban dicho enlace. En primer lugar, la tesis ha investigado la selección de los dispositivos que han de actuar como retransmisores de los datos en el primer salto de la ruta. En este contexto, se ha estudiado y analizado el impacto de dicha selección sobre el área en la cual es posible garantizar una fiabilidad superior a la fiabilidad objetivo predefinida. Los resultados obtenidos han demostrado que existe una separación óptima entre los dispositivos utilizados como primer salto en las rutas multi-salto con origen o destino dispositivos móviles. Esta separación óptima maximiza el área sobre la que se garantiza un nivel de fiabilidad superior al mínimo objetivo. También se ha propuesto una metodología computacionalmente eficiente para la identificación de la separación entre dispositivos estáticos que conforman las dos rutas utilizadas por el dispositivo móvil. Los resultados obtenidos han demostrado que la metodología propuesta obtiene resultados próximos a los obtenidos al identificar la separación óptima. Tras identificar la separación óptima a la que deberían encontrarse los dispositivos retransmisores estáticos para reducir el número de reasignaciones de rutas y enlaces en transmisiones desde/hacia dispositivos móviles, se han propuesto, evaluado y comparado tres alternativas para la reasignación de rutas y enlaces de comunicación. El objetivo de estas propuestas ha sido el de reducir el número de reasignaciones que se han de realizar durante el desplazamiento de un dispositivo móvil a la vez que se mantiene una fiabilidad *end-to-end* por encima de una fiabilidad objetivo. La propuesta RLS (*Route and Link Selection for mobile IWSN*) evita las reasignaciones de rutas *HARD*, y busca reducir el número de reasignaciones de rutas *SOFT* ocasionadas por el desplazamiento de los dispositivos móviles. Los resultados obtenidos han demostrado que RLS consigue reducir el número de reasignaciones en escenarios en los que los dispositivos estáticos se encuentran separados la distancia óptima previamente identificada. Además, RLS consigue garantizar un nivel de fiabilidad *end-to-end* objetivo, aunque empeora ligeramente la fiabilidad *end-to-end* promedio y el retardo *end-to-end* promedio. Las técnicas RLS2 (*Route and Link Selection for mobile IWSN with 2 links per hop*) y RLSS (*Route and Link Selection for mobile IWSN with Shared links*) consiguen mejorar la fiabilidad *end-to-end* promedio y el retardo *end-to-end* promedio con respecto a RLS a la vez que reducen el número de reasignaciones necesarias con respecto a la técnica de referencia WH-RLS (*WirelessHART Route and Link Selection*).

## 7.5 Líneas futuras de investigación

Las investigaciones llevadas a cabo en esta tesis doctoral han demostrado la necesidad de evolucionar los actuales estándares inalámbricos industriales, por ejemplo el estándar WirelessHART, para soportar de forma eficiente la movilidad de los dispositivos a la vez que se garantiza la fiabilidad y el retardo de las comunicaciones. Esta tesis ha contribuido a este objetivo, y la investigación realizada ha permitido identificar nuevas líneas de investigación.

Una extensión natural del trabajo realizado en esta tesis doctoral sería la implementación y evaluación de los protocolos propuestos utilizando dispositivos *hardware* reales. Este tipo de implementaciones permitiría confirmar la viabilidad y validez de las propuestas realizadas en despliegues reales, y abordar problemas relacionados con los mismos como podría ser la sincronización entre los dispositivos de la red. Por desgracia, hasta la fecha, se desconoce la existencia de dispositivos que implementen el estándar de comunicaciones WirelessHART y que proporcionen una implementación de su pila de protocolos en código abierto para que pueda ser modificada.

Esta tesis se ha centrado principalmente en el desarrollo de mecanismos para evolucionar el estándar WirelessHART de forma que se pueda garantizar de forma eficiente la fiabilidad y el retardo de las comunicaciones realizadas por parte de dispositivos móviles. Tal y como se ha comentado en el capítulo 4, resulta posible adaptar los protocolos de descubrimiento de vecinos propuestos a otros estándares, como el estándar ISA100.11a o el estándar IEEE 802.15.4e, si bien tendrían que estudiarse con mayor profundidad cómo deberían ser adaptados. De forma similar, el rendimiento de LIKUID también podría ser evaluado bajo otras tecnologías de acceso radio basadas en TDMA con gestión centralizada en la que la transmisión entre origen y destino requiera de múltiples saltos. Además, convendría estudiar si sería posible utilizar las transmisiones recibidas por los dispositivos cuando están en modo escucha (y no son destinatarios de dichas transmisiones) para mejorar la fiabilidad y reducir el retardo de las transmisiones realizadas cuando se emplea LIKUID.

Las evaluaciones de la fiabilidad y el retardo realizadas en la tesis se han centrado en transmisiones en las que el dispositivo móvil es el origen de los datos, si bien también sería interesante el futuro estudio y evaluación del caso de utilizar dispositivos móviles como retransmisores en las rutas de los paquetes. Así, sería interesante estudiar si es posible mejorar la fiabilidad cuando se pueden utilizar dispositivos retransmisores



móviles, y el impacto que esto tendría, por ejemplo, en el número de reasignaciones a realizar por utilizar enlaces de comunicación con una validez limitada y determinada por la movilidad de los dispositivos.

De los tres retos identificados en la presente tesis, queda el asociado al acceso de un dispositivo móvil a la red tras la pérdida de la conectividad con la red como futura línea de investigación. Cuando un dispositivo móvil pierde la conectividad con la red, no dispone de rutas ni enlaces de comunicación asignados con los dispositivos que están en su rango de comunicación, si bien el dispositivo sigue sincronizado con la red, y por tanto conoce el identificador de la red y los canales de frecuencia utilizados, y dispone de una clave de sesión válida. En este contexto, sería interesante estudiar y proponer alternativas para el acceso de un dispositivo móvil a la red explotando el conocimiento por parte del dispositivo de todos estos parámetros.

El acceso inicial, y la reconfiguración de las rutas y los enlaces de comunicación, son procesos que el estándar WirelessHART no define formalmente, y que resultan complejos de gestionar en el marco de una red con gestión centralizada. En este contexto, sería interesante extender el análisis realizado, y proponer diferentes alternativas para la distribución de los paquetes de gestión relativos al acceso inicial de un dispositivo y a la reconfiguración de las rutas y los enlaces de comunicación. Además, convendría evaluar la posibilidad de proponer mecanismos descentralizados, o parcialmente descentralizados, para la gestión de los enlaces de comunicación. Esta cuestión ha sido parcialmente iniciada en esta tesis a través de la propuesta LIKUID.

La tendencia actual para alcanzar altos niveles de fiabilidad, menores niveles de latencia, y mayor ancho de banda es la 5G. El 5GPPP ha establecido directrices centradas en el desarrollo de tecnologías innovadoras que permitan: (1) disponer de fábricas reconfigurables, adaptativas y evolutivas para producción a pequeña escala; (2) obtener alto rendimiento de la producción con precisión; flexibilidad y cero defectos con una utilización eficiente de los recursos; (3) trabajar en lugares seguros y atractivos; (4) reducir el consumo de energía y agua; y (5) tratar de alcanzar cero emisiones, incluyendo ruido y vibraciones. En este contexto, por un lado, será importante estudiar y favorecer la coexistencia entre los actuales estándares industriales y la tecnología 5G en aquellas aplicaciones industriales que en un futuro opten por trasladarse a la tecnología 5G en virtud de las mejoras que presenten. Por otro lado, también será importante evolucionar los actuales estándares industriales como WirelessHART de cara a, por ejemplo, la mejora de los procesos de monitorización y control industriales mediante

sensores inalámbricos en aquellos casos que, por diferentes motivos, se opte por seguir utilizando los estándares que operan en la banda de frecuencias de uso sin licencia.



# Anexo A.

## Plataforma de simulación: descripción y validación

The performance of the different neighbor discovery protocols presented in chapter 4 has been evaluated using a simulation platform implemented in this PhD Thesis. Figure A-1 shows the main components of the implemented simulation platform. The platform implements in detail all the functions that intervene in the neighbor discovery process, which include the necessary functions at the *Network Manager*, a detailed radio propagation model, a mobility model, and the main modules of the physical and MAC layers of the WirelessHART protocol stack. All the modules have been implemented following the WirelessHART standard and state-of-the-art simulation practices (e.g. for the propagation and interference modeling) and have been validated in detail. The simulation platform has been implemented from scratch in Matlab. A description of the main modules and their validation is presented below.

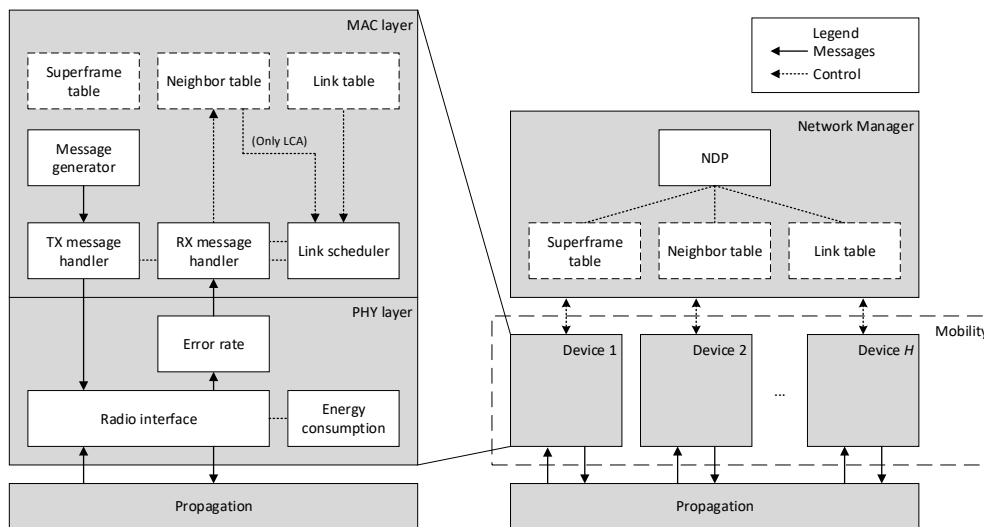


Figure A-1. Diagram of the simulation platform implemented.

## a. Propagation

Using accurate radio propagation and interference models in simulation studies is crucial to obtain valid simulation results. To account for realistic propagation conditions, the simulation platform implements the radio propagation model proposed in [26] for industrial environments. In [26], narrow-band measurements were performed in two wood processing and two metal processing factories at three frequencies (900MHz, 2.4GHz and 5.2GHz). For each frequency band, [26] considers 4 different sets of parameters, each of them corresponding to a LSF (Large-Scale Fading) topography:

- LSF topography 1: line-of-sight (LOS) path.
- LSF topography 2: obstructed line-of-sight (OBS) path with light surrounding clutter.
- LSF topography 3: obstructed line-of-sight (OBS) path with heavy surrounding clutter.
- All LSF topographies considered together.

The model proposed in [26] considers a one-slope log-distance path-loss model and takes into account the fading effects through a log-normal random distribution. The following table from [26] shows the path loss  $PL(d_0)$  at reference distance  $d_0=15\text{m}$  and the path-loss exponent  $n$  of the one-slope model, as well as the standard deviation  $\sigma$  in dB of the log-normal random distribution. The table shows the parameters for all the different frequency bands for each LSF topography.

Frequency [MHz]	LSF topography	Non-fixed intercept			Fixed intercept		
		$PL(d_0)$ [dB]	$n$ [-]	$\sigma$ [dB]	$PL(d_0)$ [dB]	$n$ [-]	$\sigma$ [dB]
900	1 (LOS)	57.67	2.25	5.65	55.05	2.68	5.74
	2 (OBS, light clutter)	64.42	1.94	4.97	55.05	3.24	5.62
	3 (OBS, heavy clutter)	69.73	2.16	5.16	55.05	4.47	6.86
	<b>All LSF topographies</b>	<b>61.65</b>	<b>2.49</b>	<b>7.35</b>	<b>55.05</b>	<b>3.51</b>	<b>7.70</b>
2400	1 (LOS)	67.43	1.72	4.73	63.57	2.40	4.97
	2 (OBS, light clutter)	72.71	1.52	4.61	63.57	2.77	5.42
	3 (OBS, heavy clutter)	80.48	1.69	6.62	63.57	4.29	8.42
	<b>All LSF topographies</b>	<b>71.84</b>	<b>2.16</b>	<b>8.13</b>	<b>63.57</b>	<b>3.44</b>	<b>8.63</b>
5200	1 (LOS)	77.57	1.25	4.32	70.28	2.47	5.19
	2 (OBS, light clutter)	81.06	0.68	3.87	70.28	2.18	4.93
	3 (OBS, heavy clutter)	83.33	1.35	3.16	70.28	3.70	5.15
	<b>All LSF topographies</b>	<b>81.01</b>	<b>0.91</b>	<b>4.79</b>	<b>70.28</b>	<b>2.59</b>	<b>6.09</b>

Figure A-2. Table I from [26] that shows parameters of non-fixed and fixed intercept one-slope models ( $d_0=15m$ ) for each LSF topography and frequency band.

To avoid limiting the simulation platform to a specific LSF topography, the model implemented in the simulation platform considers the parameters corresponding to the four topographies at the 2.4 GHz band (the frequency band of WirelessHART) for non-fixed intercept. It is important noting that the analysis presented in [26] indicates that the use of a path-loss model with non-fixed intercept is preferred over a fixed-intercept model. The propagation models implemented in the simulation platform have been validated considering the LSF topography 1 for 900 MHz since experimental results are shown in [26] for the 900 MHz band. The measurements from [26] are shown in Figure A-3, while the pathloss values obtained with the implemented simulation platform are shown in Figure A-4. A comparison of both figures shows that the model implemented in the simulation platform matches the results published in [26].

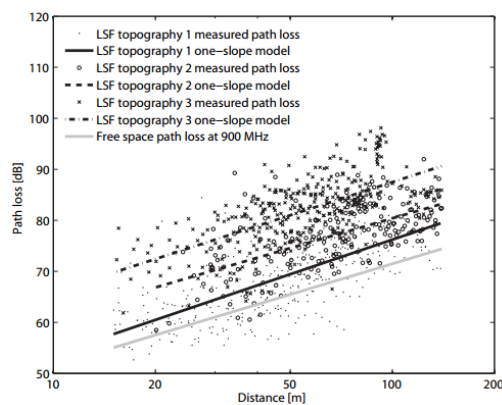


Figure A-3. Pathloss in dB as a function of the distance. This figure was published in [26] and represents the model for the different LSF topographies at 900MHz. [26] does not include a figure with results at 2.4GHz.

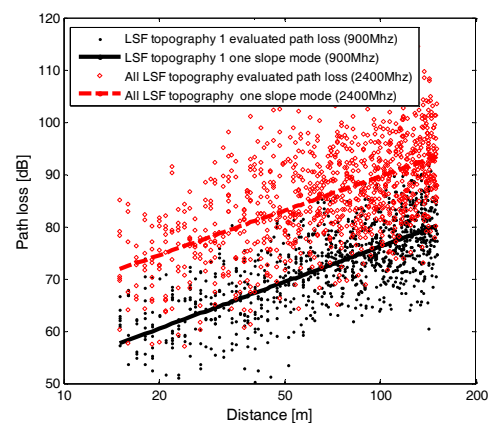


Figure A-4. Pathloss in dB as a function of the distance. The values are obtained using the simulation platform for the models corresponding to LSF topography 1 at 900MHz and All LSF topography at 2.4GHz.

## b. PHY layer

At the physical layer, the simulation platform follows the same methodology as well-known simulators. The platform operates at the packet level and probabilistically determines if a packet is correctly received or not based on its SINR (Signal to Interference and Noise Ratio) and an error rate model that emulates the performance of the physical layer of IEEE 802.15.4 (which is the physical layer adopted by the WirelessHART standard [10]).

To this aim, the radio interface at each receiver is in charge of calculating the SINR. In dedicated time slots (where only one packet transmission is permitted in the network), there is no interference and the radio interface computes the SINR of the received packet using the received power level (obtained with the propagation model) and the average noise power ( $N=-93\text{dBm}$ ). In shared time slots (where multiple packets can simultaneously arrive to the receiver), the radio interface considers the packet with highest received power level as the candidate packet to be received, and the rest of packets are considered as interference and are used to calculate the SINR. As indicated in the IEEE 802.15.4 standard, the effect of the interfering packets on the desired packet is assumed to be similar to Additive White Gaussian Noise (AWGN) in the same bandwidth; this is also a common practice in well-known simulators.

The simulation platform implements the error rate model proposed in the IEEE 802.15.4 standard for AWGN channels at 2.4GHz. The implemented model considers the OQPSK modulation that is used in WirelessHART. The model description can be found in the IEEE 802.15.4-2006 standard. This model considers the following BER (Bit Error Rate) equation that relates the SINR and the BER:

$$BER = \frac{8}{15} \times \frac{1}{16} \times \sum_{k=2}^{16} (-1)^k \binom{16}{k} e^{\left(20 \times SINR \times \left(\frac{1}{k} - 1\right)\right)} \quad (\text{Anexo A-1})$$

This BER model has been implemented in the simulation platform. To validate the implementation, it is compared the figures below where the implemented BER curve is shown in the Figure A-5, and the BER curve available in the IEEE 802.15.4 standard for a scenario without interference is shown in the Figure A-6.

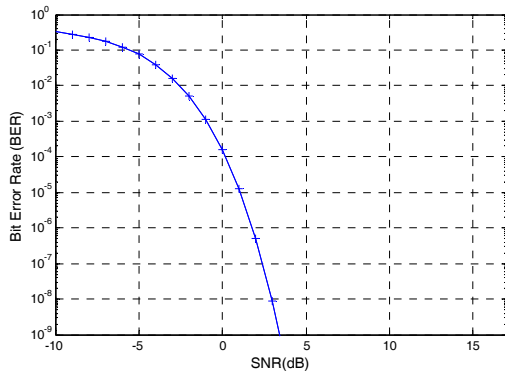


Figure A-5. Bit Error Rate model implemented in the simulation platform.

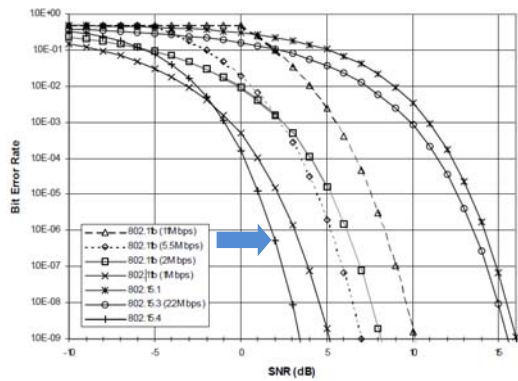


Figure A-6. Bit Error Rate model in IEEE 802.15.4-2006 [13].

The PDR (Packet Delivery Ratio) is obtained with the following equation that considers that a single bit error is sufficient to corrupt a packet of  $B$  bytes:

$$PDR = (1 - BER)^{8 \cdot B} \quad (\text{Anexo A-2})$$

The PER (Packet Error Rate) can be obtained as  $PER = 1 - PDR$ , and has been validated against the XDM2510H transceiver, a WirelessHART transceiver of RF Monolithics [41]. The following table shows the radio specifications of this transceiver. It specifies a *Receiver sensitivity* of -92.5dBm at PER of 50%, and a *Receiver sensitivity* of -90dBm at PER of 1%. The *Receiver sensitivity* is defined in the IEEE 802.15.4-2006 standard [13] as the threshold input signal power that yields a specified PER for a PSDU (Physical layer Service Data Unit) length equal to 20 octets when interference is not present. The following figure compares the PER model implemented in the simulation platform with the receiver sensitivity specifications of the XDM2510H transceiver. As it can be observed from Figure A-7, a 50% PER is obtained with the implemented simulator at -92.5dBm (also a 1% PER at -90dBm), which coincides with the specifications of the XDM2510H transceiver. These results validate then the implemented model.

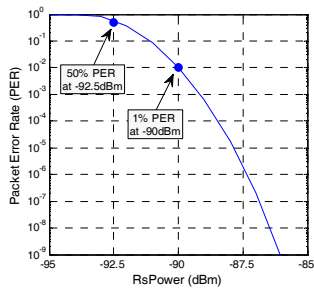


Figure A-7. PER model implemented.

Parameter	Minimum	Typical	Maximum	Units	Comments
Operating frequency	2.4000		2.4835	GHz	
Number of channels		15			
Channel separation		5		MHz	
Occupied channel bandwidth		2.7		MHz	at -20 dBc
Frequency accuracy	-40		+40	ppm	
Modulation					IEEE 802.15.4 DSSS
Raw data rate		250		kbps	
Receiver operating maximum input level		0		dBm	
Receiver sensitivity		-92.5		dBm	At 50% PER, $V_{DD} = 3.6$ V, 25 °C
		-90.0		dBm	At 1% PER, $V_{DD} = 3.6$ V, 25 °C
Output power, conducted		+8		dBm	$V_{DD} = 3.6$ V, 25 °C

Figure A-8. Radio specifications of the XDM2510H transceiver [41].

The physical layer of the implemented simulation platform is also in charge of computing the energy consumed by the transmission and reception of packets. To do so, the implemented simulation platform follows the WirelessHART time slot structure and timing and the values specified in the WirelessHART standard [10], that are shown below in Figure A-9. For example, the transmission should start after  $TsTxOffset$  ms (Figure A-10a) from the start of the slot. The destination device should start listening to the channel  $TsRxOffset$  ms (Figure A-10b) after the start of the slot, and stay in listening mode at least a time equivalent to  $TsRxWait$ .

Symbol	Definition	Required value
TsTxOffset	Start of the slot to start of preamble transmission	2 120 $\mu$ s $\pm$ 100 $\mu$ s
TsRxOffset	Start of the slot to when transceiver shall be listening	1 120 $\mu$ s $\pm$ 100 $\mu$ s
TsRxWait	The minimum time to wait for start of message; this correlates to the amount of drift between the neighbors that can be tolerated to maintain communications.	2 200 $\mu$ s $\pm$ 100 $\mu$ s
TsMaxPacket	The amount of time it takes to transmit the longest possible packet that includes PhL preamble, delimiter, length and DLPDU	4 256 $\mu$ s
TsTxAckDelay	End of message to start of ACK; the destination device shall validate the STX, and generate an ACK, if required, during this interval.	1 000 $\mu$ s $\pm$ 100 $\mu$ s
TsRxAckDelay	End of transmit PhPDU to when transceiver shall be listening for ACK	800 $\mu$ s $\pm$ 100 $\mu$ s
TsAckWait	The minimum time to wait for the start of an ACK	400 $\mu$ s $\pm$ 100 $\mu$ s
TsAck	Time to transmit an ACK (26 octets)	832 $\mu$ s
TsCCAOffset	Start of slot to beginning of CCA	1 800 $\mu$ s $\pm$ 100 $\mu$ s
TsCCA	Time to perform CCA ( 8 symbols)	128 $\mu$ s
TsRxTx	The longer of the time it takes to switch from reception to transmission or vice versa (12 symbols)	192 $\mu$ s
TsError	This is the difference between the actual start of message and the ideal start of message time as perceived by the receiving device. In other words, this is how much the receiving device perceives the transmitting device to be out of sync.	

Figure A-9. Table 34 of the WirelessHART standard (“Slot timing definitions and values”).

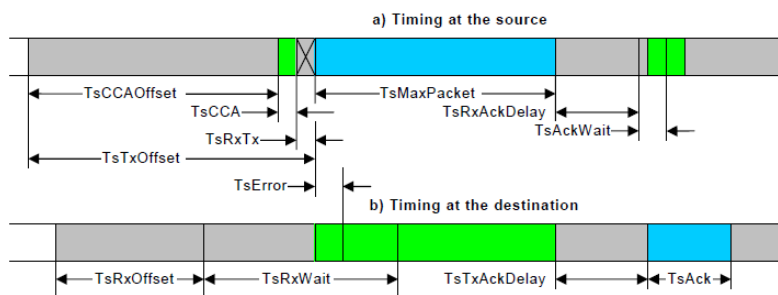


Figure A-10. Figure 19 of the WirelessHART standard (“Slot timing details”).

The simulation platform is configured with the power consumption of the XDM2510H WirelessHART transceiver when it is powered with 3.6V [41]. This results in a power consumption of 18mA when the transceiver is in transmission mode and 6mA when the transceiver is in reception mode (Table 2 and Table 3 of radio specifications of the XDM2510H transceiver, which are shown below in Figure A-11 and Figure A-12, respectively). Depending on the number of bytes of the transmitted or received packet,



and on whether the packet is acknowledged or not, the energy consumption changes. When the received signal strength of a packet is below the minimum signal needed to start the reception process, the device goes to idle mode. The energy consumption in the idle mode has been estimated following the WirelessHART standard. The standard establishes that the destination device should start listening to the medium  $TsRxOffset$  after the start of the slot. The destination device should continue checking for the start of the message until time  $TsRxOffset + TsRxWait$  from the start of the slot; i.e. the receiver turns off the radio approximately 2ms after it was turned on when the received signal strength of a DLPDU is below the minimum signal needed to start the reception process [10]. Taking into account these considerations, Table A-1 presents the energy consumption associated to different transmission and reception processes. These consumption values are implemented in the simulation platform, and have been derived considering the WirelessHART time slot structure and XDM2510H transceiver specifications. The values are used to analyze the energy consumption of the different neighbor discovery protocols.

Table A-1. Energy consumption values considered in the simulation platform.

<i>Symbol</i>	<i>Energy consumption</i>	<i>Description</i>
$E_{idle}$	43.2 $\mu$ J	Average energy consumed per device in idle mode
$E_{list}$	4.1 $\mu$ J	Energy consumed by a device when transmitting the neighbor list attached to each <i>Advertise</i> (4.1 $\mu$ J per neighbor)
$E_{Rx-KA}$	39.0 $\mu$ J	Energy consumed by a device when receiving a <i>Keep-alive</i>
$E_{ACK}$	53.9 $\mu$ J	Energy consumed by a device when transmitting an ACK
$E_{Rx-Ad}$	52.1 $\mu$ J	Energy consumed by a device when receiving an <i>Advertise</i>
$E_{Tx-KA}$	66.4 $\mu$ J	Energy consumed by a device when transmitting a <i>Keep-alive</i>
$E_{Tx-Ad}$	87.8 $\mu$ J	Energy consumed by a device when transmitting an <i>Advertise</i>

Parameter	Minimum	Typical	Maximum	Units	Comments
Operational Supply Voltage Range (between $V_{DD}$ and $V_{SS}$ )	2.85	3.60	5.50	V	including noise and load regulation
Voltage Supply Noise			100	mV <sub>pp</sub>	50 Hz to 2 MHz
Operating Temperature Range	-40		+85	°C	
Maximum Allowed Ambient Temperature Ramp During Operation			8	°C/min	-40 °C to +85 °C
Operating Relative Humidity	10		90	% RH	non-condensing

Unless otherwise noted,  $V_{DD}$  is 3.6 V and temperature is -40 °C to +85 °C.

Figure A-11. “Normal operating conditions” of the XDM2510H transceiver [41].

Parameter	Minimum	Typical	Maximum	Units	Comments
Transmit		18		mA	
Receive		6		mA	
Sleep		8.5		$\mu$ A	

Figure A-12. “Current consumption” of the XDM2510H transceiver [41].

The following figures present the time evolution of the energy consumed by a static device at the center of the grid topology 2 with 25 static devices presented in Figure 4-3. They have been obtained with the simulation platform and are depicted to show that the platform adequately models the energy consumption of neighbor discovery protocols.

Figure A-13 considers the WirelessHART neighbor discovery protocol (WH). This protocol is based on the transmission and reception of *Keep-alive* DLPDUs in *Discovery Links*, which are links shared by all devices. Each device randomly determines if it should transmit a *Keep-alive* DLPDU or be in reception mode in each *Discovery Link* following the WirelessHART standard. Figure A-13 shows the time evolution of the energy consumed by a single device, where each bar corresponds to the energy consumed in each *Management Superframe*. Since it is considered one *Discovery Link* per *Management Superframe*, the height of each bar corresponds to the energy consumed for the transmission of a *Keep-alive* DLPDUs ( $E_{Tx-KA}$ ), the reception of a *Keep-alive* DLPDUs ( $E_{Rx-KA}$ ), the reception of a *Keep-alive* DLPDUs plus the transmission of an *ACK* DLPDUs ( $E_{Rx-KA}+E_{ACK}$ ), or the consumption associated to the idle mode ( $E_{idle}$ ). The specific energy consumption in each *Management Superframe* is random because the device randomly selects to be in transmission or reception mode following the WirelessHART standard, but is in line with the values presented in Table A-1. In this particular example, the device transmitted a *Keep-alive* DLPDU in the first *Management Superframe*. In the second *Management Superframe*, it received a *Keep-alive* DLPDU and responded with an *ACK* DLPDU because the *Keep-alive* DLPDU was addressed to this device. In the third *Management Superframe*, it also received a *Keep-alive* DLPDU but this DLPDU was not addressed to this device so it did not transmit an *ACK* which explains the lower energy consumption. This figure shows that the implemented energy consumption module provides consumption values in line with the operation of the WirelessHART neighbor discovery protocol.

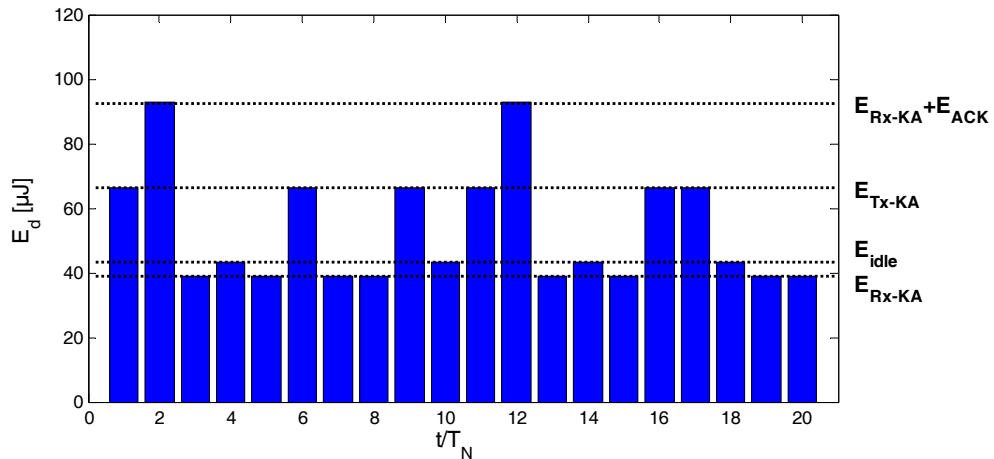


Figure A-13. Time evolution of the energy consumed by a device running the WirelessHART neighbor discovery protocol in the grid topology 2.

Figure A-14 considers LAN neighbor discovery protocol. With LAN, each device is scheduled to transmit one *Advertise* DLPDU in each *Management Superframe* in a *Dedicated Link*, and is also scheduled in reception mode to listen to the *Advertise* DLPDUs transmitted by all the other network devices. As a result, in a network with  $H$  devices the maximum energy consumed by a device in a *Management Superframe* is  $E_{Tx-Ad} + (H-1) \cdot E_{Rx-Ad}$ , but this only happens when the device is able to sense all the *Advertise* DLPDUs transmitted by all the other devices. When an *Advertise* DLPDU is not received with sufficient signal strength, the device goes into idle mode and consumes  $E_{idle}$ . As a result, the minimum energy consumed by a device in a *Management Superframe* would be  $E_{Tx-Ad} + (H-1) \cdot E_{idle}$ , but this only happens when the device is totally isolated. Figure A-14 plots the time evolution of the energy consumed by the device in the center of the grid topology 2 ( $H=25$  devices) presented in Figure 4-3. As it can be observed, the energy consumed by this device is always between  $E_{Tx-Ad} + 24 \cdot E_{Rx-Ad} = 1338 \mu\text{J}$  and  $E_{Tx-Ad} + 24 \cdot E_{idle} = 1124 \mu\text{J}$ . Due the network topology and propagation conditions, this device receives 4 *Advertise* DLPDUs per *Management Superframe* with high probability, but goes into idle mode during 16 *Advertise Links* also with high probability because they are transmitted by devices at a distance longer than the sensing range. Due to the probabilistic nature of the radio transmissions, the remaining 4 *Advertise* DLPDUs are only received by the center device in some *Management Superframes*, and that is why the energy consumed by the device randomly oscillates between the mentioned values. Please note that the values shown in this figure are used to illustrate the correct operation of the implemented simulation platform, but the average energy consumed by LAN (eq. (31)) does not consider the energy consumed by devices transmitting

Advertise DLPDUs ( $E_{Tx-Ad}$ ) since they have to be transmitted anyway to help new devices join the network. As a consequence the energy consumption shown in blue color (Advertise Tx) in Figure A-14 is not included in the energy consumed by LAN in Table 4-4.

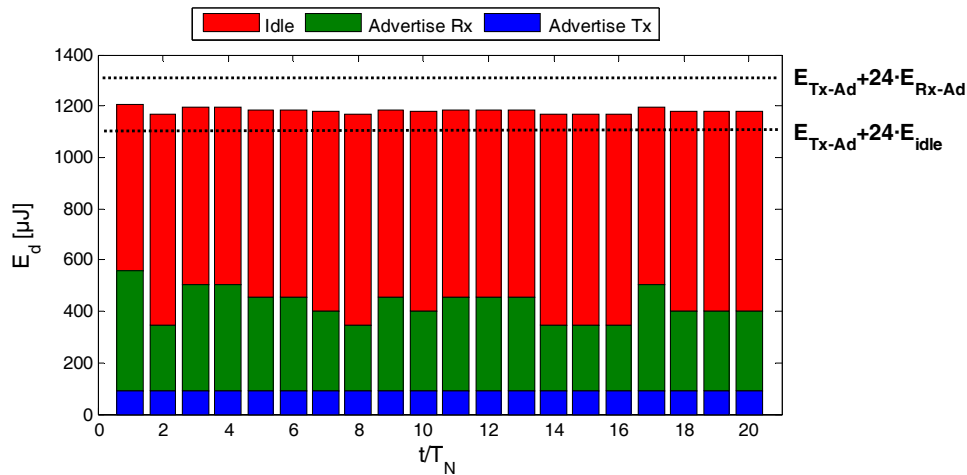


Figure A-14. Time evolution of the energy consumed by a device running the LAN neighbor discovery protocol in the grid topology 2.

With LANm, the operation and energy consumption of static and mobile devices is notably different. All of them transmit one *Advertise* DLPDU per *Management Superframe*, but only mobile devices are scheduled to be in reception mode to listen the *Advertise* DLPDUs transmitted by the other devices. In addition, all devices run the WirelessHART neighbor discovery protocol and therefore transmit or receive *Keep-alive* DLPDUs in the *Discovery Link* of the *Management Superframe*. Figure A-15 plots the time evolution of the energy consumed by a static device in different *Management Superframes*. As it can be observed, the energy consumed by the device in each *Management Superframe* is equal to the energy consumed by the transmission of one *Advertise* DLPDU plus the energy consumed by the WirelessHART neighbor discovery protocol (transmission/reception of *Keep-alive* DLPDUs as shown in Figure A-13 in detail). Figure A-16 shows the time evolution of the energy consumed by a mobile device in the same scenario as in the previous two figures. The consumption associated to the transmission of *Advertise* DLPDUs is again constant since the device always transmits one *Advertise* DLPDU per *Management Superframe*. The energy consumption associated to the reception of *Advertise* DLPDUs depends on the number of *Advertise* DLPDUs that are received with a signal strength higher than the minimum required in each *Management Superframe*; otherwise, the device goes into idle mode and the energy consumed is lower. As the device moves, the number of *Advertise Links* during which the device goes into idle mode changes; this explains why the green contribution

(Advertise Rx) and red contribution (Idle) in Figure A-16 change over time. Figure A-16 also differentiates the energy consumed by the transmission/reception of *Keep-alive* DLPDUs (the WirelessHART neighbor discovery protocol). As explained in Figure A-13, the energy consumed in each *Management Superframe* for the transmission/reception of *Keep-alive* DLPDUs randomly changes over time, but the values follow Table A-1. Please note again that the results shown in Figure A-15 and Figure A-16 are used here to illustrate the correct implementation and operation of the energy consumption module. However, the energy consumption associated to LANm and presented in Table 4-4 does not include the energy consumed by devices transmitting *Advertise* DLPDUs ( $E_{Tx-Ad}$ ) since they have to be transmitted anyway to help new devices join the network.

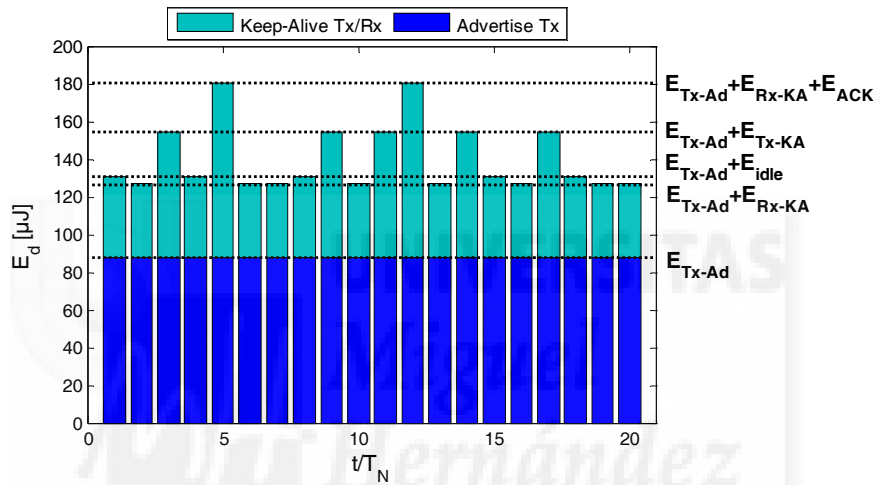


Figure A-15. Time evolution of the energy consumed by a static device running the LANm neighbor discovery protocol in the grid topology 2.

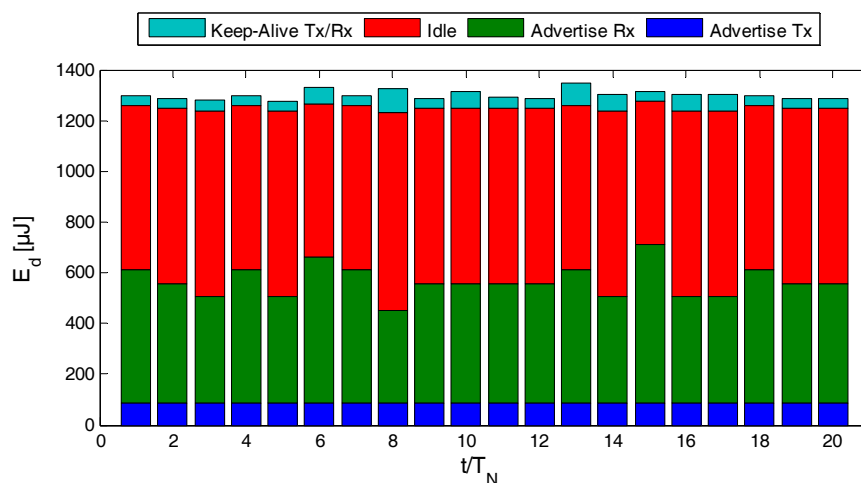


Figure A-16. Time evolution of the energy consumed by a mobile device running the LANm neighbor discovery protocol in the grid topology 2.

In the case of LCA, devices are scheduled to transmit one *Advertise* DLPDU per *Management Superframe*, and they individually decide whether to be in reception mode or not during the transmission of the *Advertise* DLPDUs of the rest of devices. As an example, Figure A-17 plots the time evolution of the energy consumed by a mobile device in different *Management Superframes* when using LCA. As it can be observed, the energy associated to the transmission of *Advertise* DLPDUs is nearly constant, since the device transmits one *Advertise* DLPDU in each *Management Superframe*. Although it is not directly visible in the figure, it is not perfectly constant because the device attaches to the *Advertise* DLPDU the list of its one-hop neighbors, and this list can change over time. When the device decides to be in reception mode to listen to a given *Advertise* DLPDU, two different situations can be produced. If the RSS is higher than the minimum threshold, it starts decoding the message and consumes  $E_{Rx-Ad}$ . Otherwise, the device goes into idle mode and consumes  $E_{idle}$ . Similarly to Figure A-16, the number of *Advertise Links* in which the device goes into the idle mode changes depending on its location, which explains why again the green contribution (*Advertise Rx*) and red contribution (*Idle*) in Figure A-17 change over time. To reduce the energy consumption, LCA allows each device to turn off their radio interface during the transmission of *Advertise* DLPDUs by devices located at more than two hops. When the device turns off the radio interface, the energy consumed is considered null in this study. This is not illustrated in Figure A-16, but its effect can be observed by comparing the energy consumption of the *Idle* and *Advertise Rx* in Figure A-17 and Figure A-16. Please note again that the results shown in Figure A-17 are used here to illustrate the correct operation of the energy consumption module, but the energy consumption of LCA presented in Table 4-4 does not include the energy consumed by devices transmitting *Advertise* DLPDUs ( $E_{Tx-Ad}$ ) since they have to be transmitted anyway to help new devices join the network.

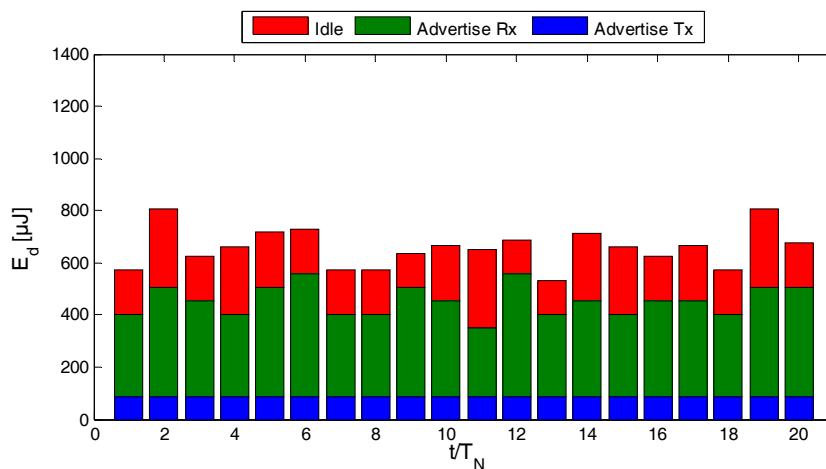


Figure A-17. Time evolution of the energy consumed by a mobile device running the LCA neighbor discovery protocol in the grid topology 2.

### c. MAC layer

The implementation of the MAC layer is in line with the WirelessHART standard, and includes all the modules that influence the neighbor discovery process. In particular, the MAC layer implemented in the simulation platform includes the following three tables that control the communications of each device and collect communication statistics following the WirelessHART standard [10]:

- *Superframe Table*: it stores the attributes of a superframe, for example, the number of slots and the unique identifier.
- *Link Table*: it stores the attributes of all links including the type of link (normal, broadcast, join or discovery), the slot number in the superframe assigned to the link, the link use (transmission, reception or shared), the channel offset, and the neighbor ID (for dedicated links) among others.
- *Neighbor Table*: it stores the ID of all devices with which the device may be able to directly communicate with (1-hop neighbors). In LCA, this table has been extended to also include 2-hop neighbors.

The WirelessHART standard also specifies the *Graph Table*, which provides the routing information to guide the delivery of a packet to its final destination. Since the study done focuses on the discovery process, the simulation platform does not implement this table.

One of the key components of the MAC layer is the *Link Scheduler*. The implementation follows the WirelessHART standard [10]. Each device has a *Link Scheduler* that evaluates the device's tables and identifies the next slot for listening or sending a message. As it can be observed in Figure A-1, the *Link Scheduler* is connected to the Tx and Rx Message Handler Modules. These modules are in charge of transmitting and receiving messages to/from the physical layer. For a given device, only one of them (Tx or Rx) can be active at the same time in the platform. The *Tx Message Handler* simply passes to the physical layer the messages generated at the MAC by the *Message Generator*, together with the information about the channel frequency to be used. The *Rx Message Handler* provides the information about the channel frequency to the physical layer, receives the messages that are successfully decoded by the physical layer, and updates the *Neighbor Table* based on such messages. The *Rx Message Handler* has a different behavior depending of the neighbor discovery protocol considered:

- The WirelessHART neighbor discovery protocol only updates the *Neighbor Table* upon the reception of *Keep-alive* DLPDUs. In fact, devices that belong to the network are not scheduled by the *Network Manager* to listen to *Advertise* DLPDUs.
- LAN and LCA update the *Neighbor Table* upon the reception of *Advertise* DLPDUs. In fact, devices do not need to be configured to listen to *Keep-alive* DLPDUs.
- LANm updates the *Neighbor Table* upon the reception of *Advertise* and *Keep-alive* DLPDUs. Mobile devices are scheduled to transmit and receive *Advertise* DLPDUs, but static devices run the WirelessHART neighbor discovery protocol (i.e. they exploit *Keep-alive* DLPDUs).

The operation of the *Link Scheduler* mainly depends on the information in the tables. The tables are configured by the *Network Manager*. Depending on the neighbor discovery protocol considered, the *Link Scheduler* has a different behavior in the implemented simulation platform:

- When devices run the WirelessHART neighbor discovery protocol, the *Link Scheduler* is in charge of managing the random timer used to decide whether to transmit or receive a *Keep-alive* DLPDU in *Discovery Links*. To this aim, the *Link Scheduler* gets from the *Link Table* the information about the existing *Discovery Links* that are configured by the *Network Manager*.
- With LAN, the *Link Scheduler* gets from the *Link Table* the information about the links where *Advertise* DLPDUs need to be transmitted and received.
- With LANm, the *Link Scheduler* of mobile devices also follows the information in the *Link Table* for the transmission and reception of *Advertise* DLPDUs. The *Link Scheduler* of static devices run the WirelessHART neighbor discovery protocol.
- With LCA, the *Link Scheduler* gets the information about all the *Advertise* DLPDUs transmitted by all devices in the network, but only listens to those devices that are at one or two hops. To this aim, LCA needs to get information also from the *Neighbor Table* as shown in Figure A-1. The information about one-hop neighbors is passed to the *Tx Message Handler* to attach their IDs to the corresponding *Advertise* DLPDUs.



Extensive tests have been conducted to validate the different modules of the MAC layer implemented in the simulation platform. The most relevant ones are presented below.

The following figures show that indeed devices are synchronized at the slot level in the implemented simulation platform; this is important to ensure a correct operation of the MAC layer. The figures represent the slots used for transmission or reception of messages by 5 network devices in a single *Management Superframe* for the different neighbor discovery protocols under study. Devices 1-3 are static and devices 4-5 are mobile (following the *Random Waypoint Mobility Model*). The figures show in red color the slots used by certain devices to transmit *Advertise* DLPDUs, in blue the slots used for the reception of *Advertise* DLPDUs, in black the slots used for the transmission of *Keep-alive* DLPDUs, and in pink the slots used for the reception of *Keep-alive* DLPDUs. Idle slots are shown in white. In Figure A-18 (WH), device 3 is in transmission mode in the *Discovery Link* (black color), while the rest of devices are in reception mode (pink color). As it can be observed, there is only one *Discovery Link* per *Management Superframe*. In this example, only one device decided to transmit a *Keep-alive* DLPDU so a collision was not produced (in WirelessHART a collision can be produced when more than one device transmit a *Keep-alive* DLPDU in the same *Discovery Link*). In Figure A-19 (LAN), each device is scheduled to transmit one *Advertise* DLPDU per *Management Superframe* in a dedicated link (red color), while the rest of devices are scheduled to be in reception mode (blue color). The same schedule is repeated in all *Management Superframes*. In Figure A-20 (LANm), all devices are configured to transmit one *Advertise* DLPDU per *Management Superframe* (as in LAN), but only mobile devices (4-5) are scheduled to be in reception mode to be able to receive them. As a consequence, the figure shows that whenever a *Keep-alive* DLPDU is transmitted by any device (red color), devices 4-5 are scheduled to be in reception mode (blue color). Additionally, with LANm all devices run the WirelessHART neighbor discovery protocol and transmit/receive *Keep-alive* DLPDUs. In the example shown in Figure A-20, devices 1 and 5 decided to transmit a *Keep-alive* DLPDU in the *Discovery Link* (black color), and a collision was produced. In Figure A-21 (LCA), all devices are scheduled to transmit one *Advertise* DLPDU per *Management Superframe*, but each device only listens to those devices that are transmitted by devices at one or two hops. In this example, devices 1 and 5 are located at more than two hops. Therefore, device 1 is not in reception mode (green color) when device 5 transmits its *Advertise* DLPDU (red color), and device 5 is not in reception mode (green color) when device 1 transmits its *Advertise* DLPDU (red color).

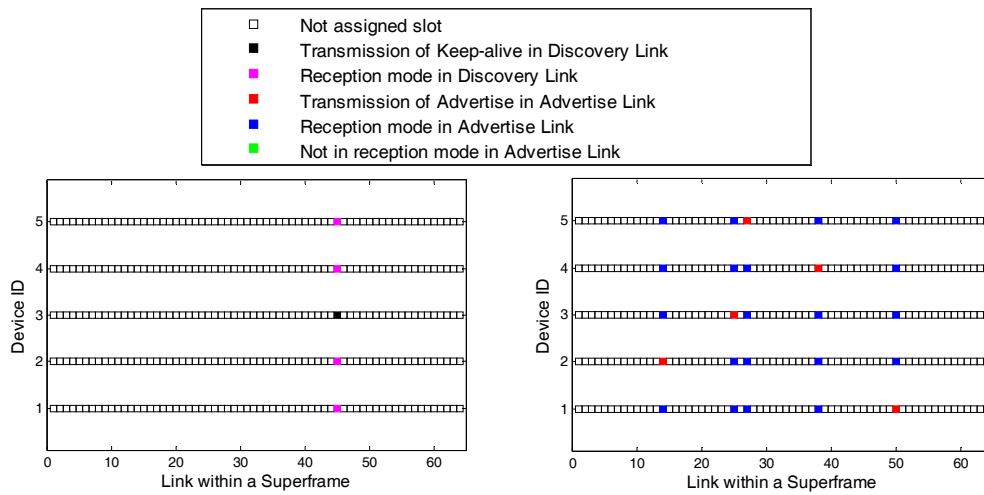


Figure A-18. Tx, Rx and idle slots for 5 devices when implementing WH.

Figure A-19. Tx, Rx and idle slots for 5 devices when implementing LAN.

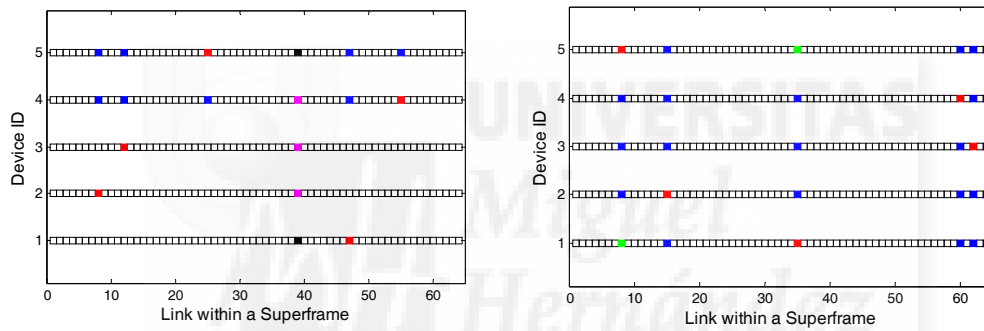


Figure A-20. Tx, Rx and idle slots for 5 devices when implementing LANm.

Figure A-21. Tx, Rx and idle slots for 5 devices when implementing LCA.

The *Link Scheduler* manages the random timer used by the WirelessHART neighbor discovery protocol to transmit *Keep-alive* DLPDUs in *Discovery Links*. The following figures illustrate the operation of the implemented *Link Scheduler* considering a simulation with  $H=16$  devices running the WirelessHART neighbor discovery protocol during  $10^6$  seconds. The duration of the *Management Superframe* is  $T_N=64s$ . Figure A-22 shows the histogram of the random samples generated by the *Link Scheduler*. As it can be observed, they are uniformly distributed between 0 and  $Discovery\_time=640s$ , which is what the WirelessHART standard requires. Figure A-23 shows the histogram of the time between consecutive *Keep-alive* DLPDUs transmissions by the same device. *Keep-alive* DLPDUs are transmitted on *Discovery Links*, and it is assumed one *Discovery Link* per *Management Superframe*. Therefore the time between consecutive *Keep-alive* DLPDUs transmissions is always multiple of the duration of the *Management Superframe*,  $T_N=64s$ . Similarly to the assumption made in the analytical model, if the

*Discovery Links* are uniformly distributed, the time between consecutive *Keep-alive* DLPDUs transmissions is also uniformly distributed. This can be observed in Figure A-23, since the histogram is approximately plain (i.e. there are the same number of samples in 64s than in 128s, 192s, etc.). The *Discovery Link* is shared by all devices, and devices randomly select whether to be in transmission or reception mode. As a result, collisions can take place. Figure A-24 shows the number of devices that simultaneously transmit a *Keep-alive* DLPDU in the same *Discovery Link*. These devices will generate a collision if their transmission ranges overlap. Figure A-25 shows the histogram of the devices that simultaneously transmit *Keep-alive* DLPDUs in the same *Discovery Link*. In average, 2.90 devices simultaneously transmit a *Keep-alive* DLPDU in this scenario using the simulation platform (see Figure A-25). This result is in line with the analytical expression provided below to compute the average number of devices simultaneously transmitting a *Keep-alive* DLPDU ( $\overline{ST}$ ), resulting in a value of 2.91 when  $H=16$  and  $DLN_i=10$ .

$$\overline{ST} = \sum_{n=0}^H n \cdot \binom{H}{n} \cdot (P_i)^n \cdot (R_i)^{H-n} = \sum_{n=0}^H n \cdot \frac{H!}{(H-n)! \cdot n!} \cdot \left(\frac{2}{DLN_i+1}\right)^i \cdot \left(\frac{DLN_i-1}{DLN_i+1}\right)^{H-i} \quad (\text{Anexo A-3})$$

In this equation,  $H$  is the number of devices in the network,  $P_i$  is the probability that a device  $i$  transmits a *Keep-alive* DLPDU in one *Discovery Link*,  $R_i$  is the probability that a device  $i$  is in reception mode in one *Discovery Link*, and  $DLN_i$  is the maximum number of *Discovery Links* between two consecutive *Keep-alive* DLPDUs for device  $i$  ( $DLN_i=10$  when  $Discovery\_time=640s$  and  $T_N=64s$ ).

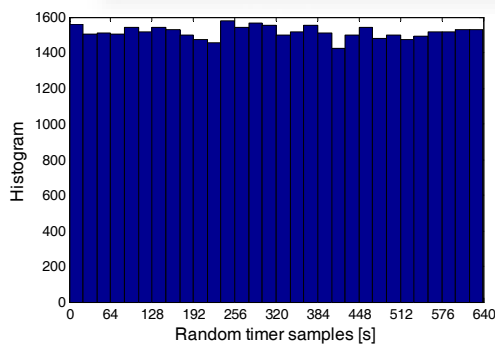


Figure A-22. Histogram of the random samples generated for the transmission of *Keep-alive* DLPDUs with the WirelessHART neighbor discovery protocol.

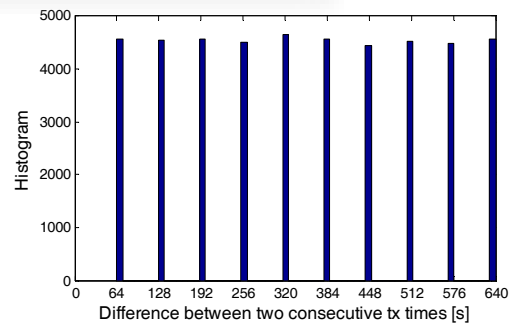


Figure A-23. Histogram of the time between consecutive transmissions of *Keep-alive* DLPDUs with the WirelessHART neighbor discovery protocol.

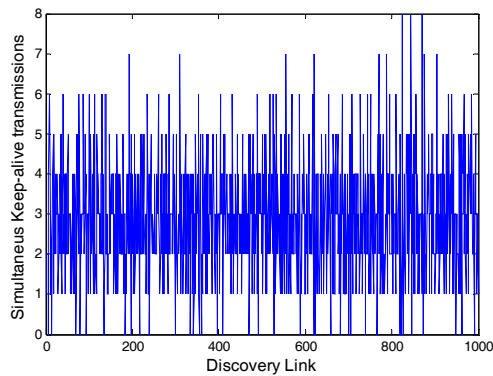


Figure A-24. Evolution of the number of devices that simultaneously transmit *Keep-alive* DLPDUs in the same *Discovery Link* with the WirelessHART neighbor discovery protocol (first 1000 *Discovery Links*).

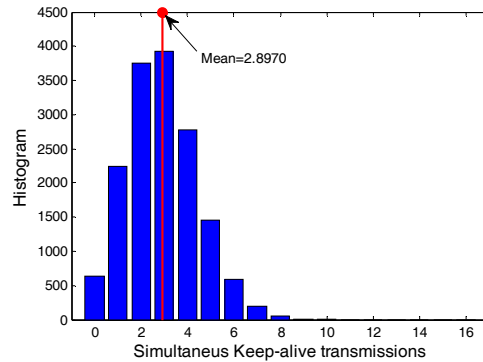


Figure A-25. Histogram of the devices that simultaneously transmit *Keep-alive* DLPDUs in the same *Discovery Link* with the WirelessHART neighbor discovery protocol.

Another important aspect for the correct operation of the MAC layer is the neighbor update. The *Neighbor Table* is updated by the *Rx Message Handler* at each device every time a new message is received (*Advertise* or *Keep-alive* DLPDU, depending on the neighbor discovery protocol). The following figures illustrate how the number of neighbors is updated using the simulation platform for 3 different devices. In particular, these figures show the time evolution of the number of neighbors of two static devices (one in the center of the scenario and the other one in one corner) and a mobile device that moves (following the Random Waypoint Mobility Model) at 1m/s in grid topology 1 presented in Figure 4-3. In this example, the number of neighbors of the mobile device goes to zero when using the WirelessHART neighbor discovery protocol (Figure A-26). Although this is only an example, it already illustrates how mobile devices can easily lose network connectivity when using the WirelessHART neighbor discovery protocol. It is also interesting to highlight that with LANm (Figure A-28), only the mobile device is able to detect other devices as it moves, but the static devices (that use the WirelessHART neighbor discovery protocol) do not detect the mobile device during the whole simulation. This example again illustrates the lower performance of WirelessHART neighbor discovery protocol to detect/maintain the connectivity of mobile devices.

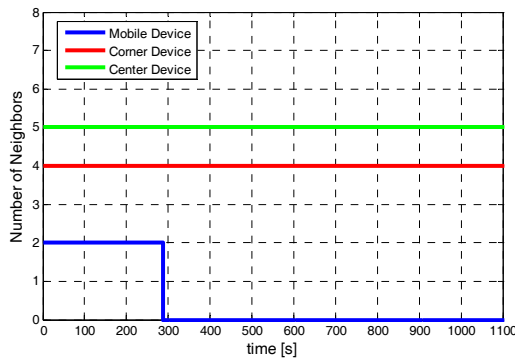


Figure A-26. Time evolution of the number of neighbors using WH.

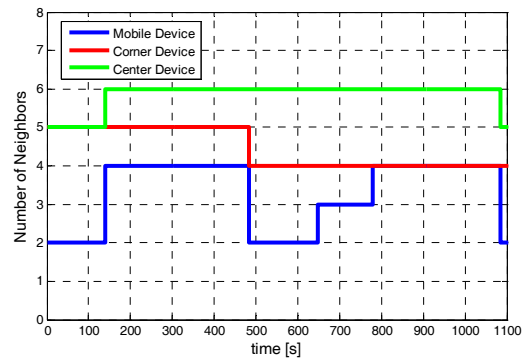


Figure A-27. Time evolution of the number of neighbors using LAN.

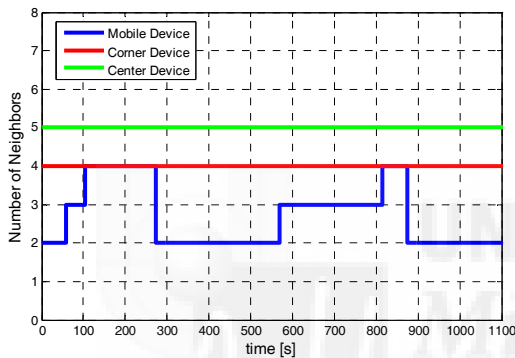


Figure A-28. Time evolution of the number of neighbors using LANm.

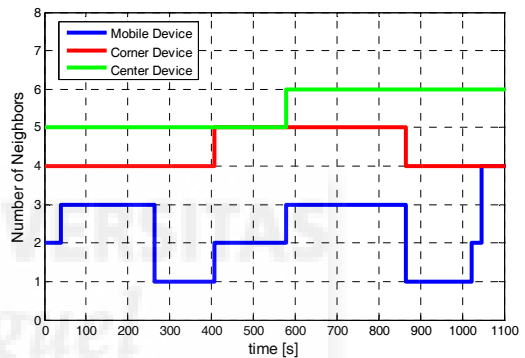


Figure A-29. Time evolution of the number of neighbors using LCA.

## d. Network Manager

The WirelessHART *Network Manager* is in charge of allocating all links in a superframe. To this aim, the *Network Manager* configures the *Link Table* of all network devices. In the implemented simulation platform, the links allocated by the *Network Manager* for the neighbor discovery process depend on the neighbor discovery protocol considered:

- WH: the *Network Manager* allocates the *Discovery Links* for the transmission of *Keep-alive* DLPDUs. *Discovery Links* are shared by all devices and therefore collisions can be produced. Once these links are allocated by the *Network Manager*, each device will randomly select to transmit a *Keep-alive* DLPDU or stay in reception mode in each *Discovery Link* (this task is performed by the *Link Scheduler*, as previously explained).

- LAN: the *Network Manager* allocates the *Advertise Links* of all devices. *Advertise Links* are dedicated links and therefore each device has its own *Advertise Link* to transmit its *Advertise DLPDU*. The *Network Manager* configures the *Link Table* of all devices so that they can listen to the *Advertise DLPDUs* sent by other devices.
- LCA: the *Network Manager* performs the same allocation as in LAN. However, the final decision to listen or not a given *Advertise DLPDU* is made locally by each device based on its *Neighbor Table*. A device will be in reception mode only for the *Advertise DLPDUs* of its one-hop and two-hop neighbors.
- LANm: the *Network Manager* allocates the *Discovery Links* for the transmission of *Keep-alive DLPDUs* as it is the case in the WirelessHART neighbor discovery protocol. In addition, the *Network Manager* allocates the transmission of *Advertise Links* to all devices in dedicated links. Only mobile devices are configured to be in reception mode when all network devices (mobile and static) send their *Advertise DLPDUs*.

Given the objectives of the study done, the simulation platform does not implement the mechanisms needed by the *Network Manager* to send to each device the corresponding *Link Table*. It is assumed that these tables are configured and sent to each device when they join the network. They do not need to be updated and as a result they do not influence the conducted study that focuses on the performance and efficiency of neighbor discovery protocols.

The *Network Manager* functions implemented in the simulation platform have been extensively validated. A series of illustrative examples are shown below to demonstrate that the implementation is correct and follows the WirelessHART standard.

The *Network Manager* function associated to the WirelessHART neighbor discovery protocol is relatively simple, since it only has to assign the *Discovery Link* in the *Management Superframe* and inform all network devices about it. At the *Network Manager*, it is verified that: 1) only one *Discovery Link* is assigned per *Management Superframe*, 2) all devices know when the *Discovery Link* takes place so that they can follow the WirelessHART method to transmit or not a *Keep-alive DLPDU*, and 3) no other DLPDUs (i.e. *Advertise DLPDU*) are scheduled to be transmitted in the *Discovery Link*. The validation of the random transmission or reception of *Keep-alive DLPDUs* was



reception of *Advertise* DLPDUs, and it shows in green color the slots where devices are not in reception mode because the device transmitting the *Advertise* DLPDU is not at one or two hops. As it can be observed, all devices have been allocated to transmit one *Advertise* DLPDU in the *Management Superframe*. All of them have also been allocated to be in reception mode to listen to the *Advertise* DLPDU transmitted by all the other devices, but each device locally decides whether it should be in reception mode only for the *Advertise* DLPDUs transmitted by their one-hop and two-hop neighbors. In this example, devices 2 and 5 are located at more than two hops. The same happens to devices 1 and 6. As a result, device 2 decides not to be in reception mode when device 5 transmits its *Advertise* DLPDU, and device 5 decides not to be in reception mode when device 2 transmits. The same occurs to devices 1 and 6. This example illustrates the correct operation of the LCA protocol implemented in the simulation platform.

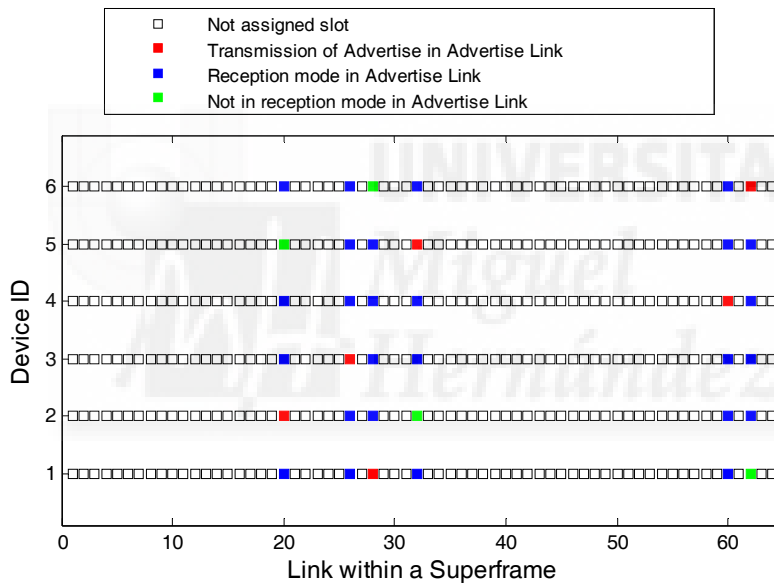


Figure A-31. Allocation of *Advertise Links* in LCA for 6 devices.

To illustrate the correct implementation of LANm at the *Network Manager*, the following figure plots the allocation of *Advertise Links* and *Discovery Links* when considering LANm. When using LANm, all devices are scheduled to transmit one *Advertise* DLPDU per *Management Superframe*, but only mobile devices are scheduled to be in reception mode to listen to all other *Advertise* DLPDUs. In addition, all devices run the WirelessHART neighbor discovery protocol based on the transmission/reception of *Keep-alive* DLPDUs in a shared *Discovery Link*. In this example, devices 1-3 are static and devices 4-6 are mobile. The figure shows in yellow color the *Discovery Link* allocated by the *Network Manager* where devices can transmit or receive the *Keep-alive* DLPDU



following the random process defined in the WirelessHART standard. As it can be observed, all devices have been allocated the *Discovery Link* and also the link to transmit one *Advertise* DLPDU per *Management Superframe*, following the LANm definition. Moreover, the figure shows that only mobile devices (4-6) are scheduled to receive all *Advertise* DLPDUs. Static devices are not scheduled to be in reception mode during the transmission of *Advertise* DLPDUs. This is exactly the intention of LANm, and this example graphically illustrates its correct implementation in the simulation platform.

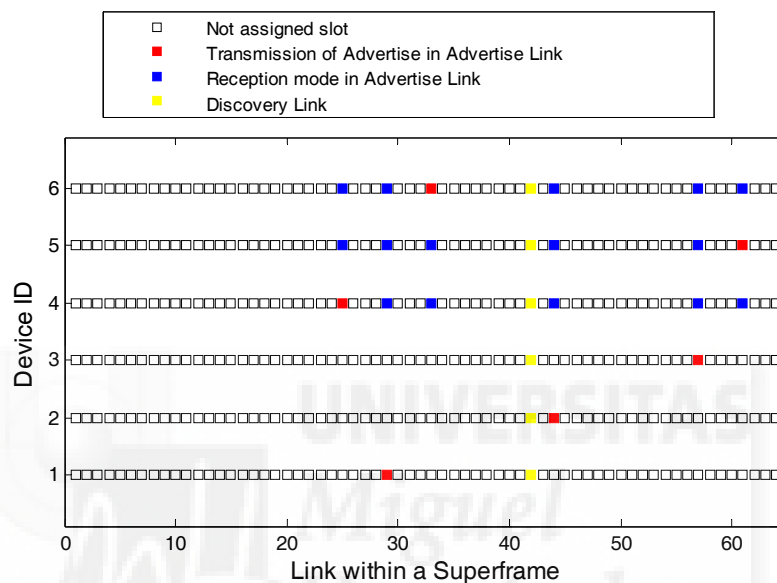


Figure A-32. Allocation of *Advertise Links* in LANm for 6 devices.

### e. Mobility

The mobility module implemented in the simulation platform supports static and dynamic topologies. The module can place the static nodes at pre-defined positions or randomly within a specified area. In the simulation platform, static nodes are placed at pre-defined positions uniformly distributed within the scenario. The mobility module implements the Random Waypoint trajectory model and also a fixed trajectory mobility model between two positions at a certain speed. Every time slot, the mobility module updates the position of all (mobile) devices before the propagation module estimates the received signal strength for each device at the radio interface.

Figure A-33, Figure A-34, Figure A-35 and Figure A-36 show, as an example to illustrate the correct operation of the implemented module, the trajectory, speed and travelled distance of a single mobile device over topology 2 (25 fixed devices)

considering that the minimum distance between fixed devices is  $d=60\text{m}$ . The figures consider 3200 seconds of simulation (i.e. 50 superframes of 64 seconds) and different speeds of the mobile device (between  $0.1\text{m/s}$  and  $3\text{m/s}$ ). Blue dots represent the position of the mobile device sampled every 10 seconds. Red circles represent static network devices. For the same scenario and conditions, Figure A-37a plots a 3D histogram of the destination position randomly selected by the mobile devices during the simulation. This figure shows that the destination position is uniformly distributed over the scenario, which is the objective of the implemented mobility model. Figure A-37b plots the histogram of the speeds randomly selected by the mobile devices during the simulation. As it can be observed, they are uniformly distributed over the target interval (between  $0.1\text{m/s}$  and  $3\text{m/s}$  in this example), which further demonstrates that the implementation of the mobility model is correct.

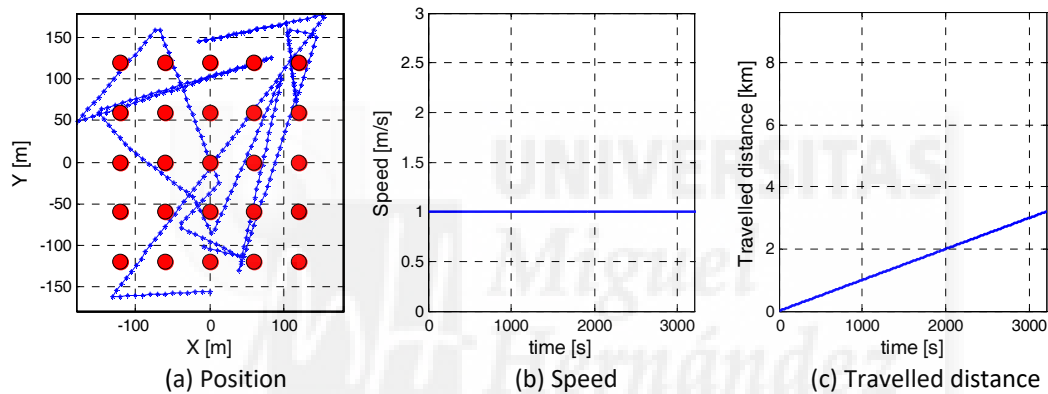


Figure A-33. Validation of the Random Waypoint mobility model implemented in the simulation platform under topology 2 when the simulation lasts 3200s. Mobility at constant speed equal to  $1\text{m/s}$ .

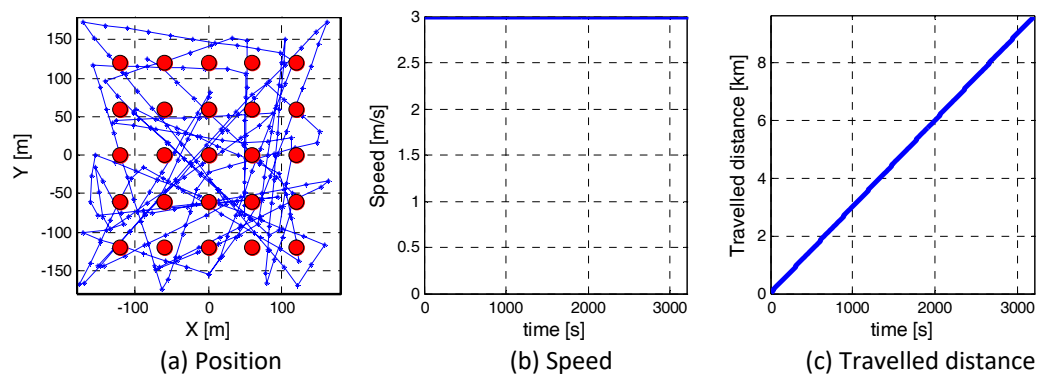


Figure A-34. Validation of the Random Waypoint mobility model implemented in the simulation platform under topology 2 when the simulation lasts 3200s. Mobility at constant speed equal to  $3\text{m/s}$ .

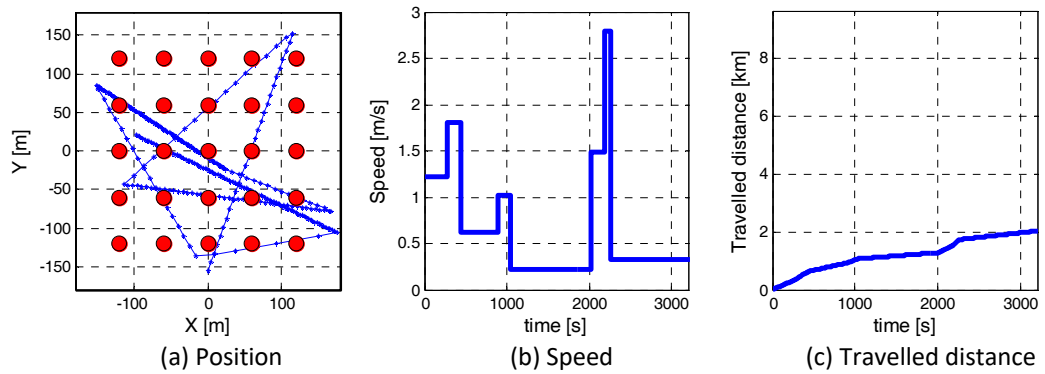


Figure A-35. Validation of the Random Waypoint mobility model implemented in the simulation platform under topology 2 when the simulation lasts 3200s. Mobility at random speed between 0.1 and 3m/s.

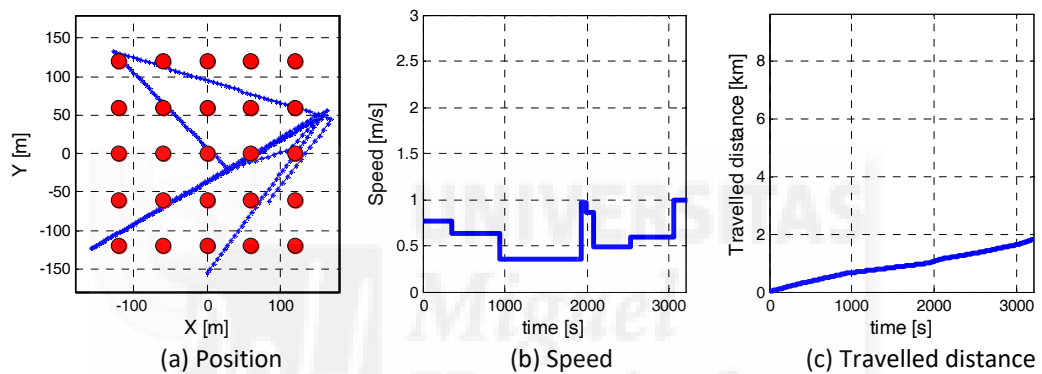


Figure A-36. Validation of the Random Waypoint mobility model implemented in the simulation platform under topology 2 when the simulation lasts 3200s. Mobility at random speed between 0.1 and 1m/s.

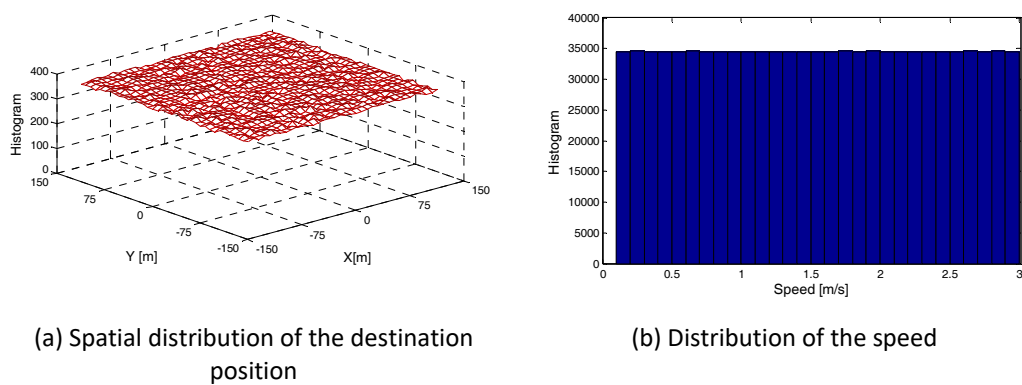


Figure A-37. Validation of the Random Waypoint mobility model implemented in the simulation platform. Mobility at random speed between 0.1 and 3m/s.



# **Anexo B.**

**Artículo: Link Scheduling Scheme  
with Shared Links and Virtual  
Tokens for Industrial Wireless  
Sensor Networks**

En cumplimiento de la normativa de estudios de doctorado de la Universidad Miguel Hernández de Elche para la presentación de tesis doctorales con un conjunto de publicaciones, en este anexo se recoge el artículo publicado en una revista incluida en las zonas del SCI, SSCI o índices presenciales catalogados como B o superior por la Universidad Miguel Hernández de Elche que da acceso a la presentación de la presente tesis doctoral con un conjunto de publicaciones y cuyo contenido es incluido en el capítulo 5 de la presente tesis doctoral.

- **Link Scheduling Scheme with Shared Links and Virtual Tokens for Industrial Wireless Sensor Networks**

S. Montero, J. Gozalvez and M. Sepulcre  
Springer Science+Business Media LLC  
*Mobile Networks & Applications*  
First Online: 26 April 2016, 17 pages  
<http://dx.doi.org/10.1007/s11036-016-0727-3>

A continuación se especifica la clasificación de la revista donde se ha publicado el artículo dentro del índice Journal Citation Reports de 2016.

- **Mobile Networks & Applications**

Impact Factor: **3.259**  
Category Name: **Computer Science, Information Systems**  
Total Journals in Category: **146**  
Journal Rank in Category: **25**  
Quartile in Category: **Q1**

En cumplimiento de la normativa se indica la afiliación de los coautores del artículo. Todos ellos pertenecen al Departamento de Ingeniería de Comunicaciones de la Universidad Miguel Hernández de Elche, situada en la Avda. de la Universidad s/n, 03202, Elche, España.

- **Sergio Montero Selma**  
smontero@umh.es
- **Javier Gozávez Sempere**  
j.gozalvez@umh.es
- **Miguel Sepulcre Ribes**  
msepulcre@umh.es

# Link Scheduling Scheme with Shared Links and Virtual Tokens for Industrial Wireless Sensor Networks

Sergio Montero<sup>1</sup> · Javier Gozalvez<sup>1</sup> · Miguel Sepulcre<sup>1</sup>

© Springer Science+Business Media New York 2016

**Abstract** Industrial wireless sensor networks can help improve the efficiency, reconfigurability and flexibility of future factories, and facilitate the introduction of new applications. Industrial applications are generally characterized with strict reliability and latency requirements. The capacity to meet such requirements is highly dependent on an efficient utilization of communication links. Such efficient utilization will become even more critical as the number of deployed sensors and traffic in factories increase. In this context, this paper presents a novel link scheduling scheme for industrial wireless sensor networks that uses shared links among nodes that are part of the same path or multi-hop route. The transmission of a message along a route acts as a virtual token to identify which node should use the shared links at each point in time. This study demonstrates that the proposed link scheduling scheme can significantly improve the reliability, latency and efficiency of industrial wireless sensor networks. The proposed link scheduling scheme is here applied to industrial wireless sensor networks, but it can be used in other centralized TDMA-based multi-hop wireless networks.

**Keywords** Industrial wireless sensor networks · Scheduling · Link scheduling · WirelessHART · ISA100.11a · Shared links · Virtual tokens · Centralized TDMA · TDMA · Multi-hop wireless networks · Reliability · Latency · Energy

✉ Sergio Montero  
smontero@umh.es

<sup>1</sup> UWICORE, Ubiquitous Wireless Communications Research Laboratory, Universidad Miguel Hernández de Elche (UMH), Elche, Alicante, Spain

consumption · Factories of the future · Industry 4.0 · Industrial wireless communications · Industrial wireless networks

## 1 Introduction

Industrial Wireless Sensor Networks (IWSNs) are expected to play a significant role in the design and operation of Factories of the Future (FoF) or the Industry 4.0. IWSNs can help reduce the cost and time needed for the installation and maintenance of cables and machinery, enhance the flexibility and reconfigurability of a factory, facilitate the introduction of healthcare solutions, and enable the connectivity of mobile subsystems or devices [1]. Significant advances have been achieved so far with the development of the WirelessHART [2] and ISA100.11a [3] standards for industrial automation and control applications. However, IWSNs still face significant challenges to ubiquitously guarantee the reliability and latency requirements of industrial applications [4].

WirelessHART and ISA100.11a are based on the IEEE 802.15.4 physical and MAC (Medium Access Layer) layers, and share some fundamental wireless technologies and mechanisms [5], e.g. a centralized network management and Time Division Multiple Access (TDMA) combined with Frequency Hopping (FH) [6]. Time slots are 10 ms long in WirelessHART, and between 10 and 12 ms long in ISA100.11a. The duration of time slots is sufficient to allow for the transmission of a packet and the reception of an acknowledgment (the maximum packet size is 133 bytes, including headers). Time slots are organized into superframes. The number of time slots within a superframe indicates its periodicity. WirelessHART and ISA100.11a can define multiple superframes with different numbers of time slots to support different transmission

intervals. A communications link (or simply a link) is defined by a timeslot offset within a superframe and a frequency channel. WirelessHART and ISA100.11a consider up to 15 different frequency channels (16 for ISA100.11a in some regions of the world). In both standards, a Network Manager (NM) is in charge of identifying and establishing the path or multi-hop route between source and destination nodes when a direct communication is not possible. The NM is also in charge of assigning the links for each hop of the path, which includes determining which nodes in each path should be assigned additional links to handle potential retransmissions. The NM has to assign the links ensuring that two nodes will not transmit simultaneously on the same link (i.e. on the same time slot and frequency channel). The scheduling scheme is hence critical to ensure the reliable and low latency delivery of messages in IWSNs.

The link scheduling process is particularly critical and challenging in industrial environments as many sensors periodically generate traffic with strict reliability and latency requirements. It is important noting that the WirelessHART and ISA100.11a standards do not specify any link scheduling scheme, but define instead a number of requirements that must be fulfilled [2]. One of such requirements for WirelessHART is that the scheduling scheme must assign at least three links per hop for attempting to transmit each message before its given transmission deadline. The first two attempts (i.e., the original transmission and one retransmission) utilize the same main path or route between the source and destination nodes. The third transmission attempt should be done over an alternative path. When scheduling links for a path, early hops should be scheduled first. The WirelessHART standard also specifies that no device can be scheduled to be in reception mode in two different channels during one time slot. Standards such as WirelessHART and ISA100.11a assign each node a fixed number of links per hop to transmit a message. The utilization of these links depends on the link quality conditions and on the number of retransmissions needed per transmitted message. A fixed assignment of links per hop might not be able to ensure high reliability levels if some hops experience particularly bad link quality conditions. It can also result in unnecessarily high latency and in an inefficient utilization of the links under good radio link quality conditions.

In this context, this paper proposes a novel link scheduling scheme that efficiently assigns and utilizes links in multi-hop IWSN communications. The proposed scheme is based on the concepts of shared links and virtual tokens. The proposed scheme uses shared links among nodes that are part of the same path or multi-hop route. The transmission of a message in the path acts as a

virtual token to identify which node is allowed to transmit at each point in time in the shared links. This approach allows for a flexible assignment and use of the links, and therefore a better capacity to combat transmission errors and reduce latency. The conducted study demonstrates that the proposed scheme can improve the reliability and latency performance compared to existing link scheduling schemes for IWSNs. In addition, the proposed scheme makes a more efficient use of resources (links and energy). The proposed link scheduling scheme is here applied to IWSN, but it is important emphasizing that it can be used in other centralized TDMA-based multi-hop wireless networks.

The rest of the paper is organized as follows. Section 2 reviews the state of the art on scheduling in IWSNs. Section 3 describes the proposed link scheduling scheme, and Section 4 describes the metrics utilized to evaluate its performance. Section 5 presents analytical performance models for the different link scheduling schemes. In particular, it presents analytical expressions of the reliability and latency performance. Section 6 presents the results obtained with the proposed scheme, and compares its performance with different existing link scheduling schemes. The main contributions and conclusions of this study are summarized in Section 7.

## 2 State of the art

Centralized and decentralized scheduling schemes have been proposed in the literature for multi-hop Wireless Sensor Networks (WSNs) [7, 8]. Decentralized schemes rely on nodes with certain intelligence and partial knowledge of their neighborhood and network status. Such knowledge is utilized for distributed decision making processes. Decentralized schemes can in principle better react to changes in the network operation and dynamics [9]. Many decentralized proposals have been designed to minimize the average time needed to transmit a message between source and destination. For example, the scheme presented in [10] exploits information obtained by nodes from their local neighborhood to assign links without any transmission collisions. A different approach is followed by the decentralized scheme presented in [11] where the destination node is responsible for assigning links based on the characteristics of the traffic generated by the source node. The decentralized schemes generally offer more flexibility and capacity to adapt to network conditions than their centralized counterparts. However, centralized schemes are more suitable for IWSNs that have strict reliability and latency requirements [4] and utilize a centralized architecture and network management [12].



In centralized schemes, all scheduling decisions are taken by a central node (e.g. the Network Manager in WirelessHART), and the remaining nodes are only responsible for the radio transmission and reception of messages, and some limited data processing functions. It is important to remember that standards such as WirelessHART do not include or define any scheduling scheme, but define instead a number of requirements that must be fulfilled. Different centralized scheduling schemes have been reported in the literature. For example, the study in [13] proposes a graph route-based link scheduling scheme to handle transmission errors using retransmissions and route diversity. A graph is a collection of paths among network nodes. The graph identifies more than one route between any pair of source and destination nodes. A different approach is reported in [14] for the case in which it is necessary to assign links for the transmission of messages between a set of source and destination nodes (not a single pair). The scheduling schemes proposed in [14] seek ensuring that all transmission deadlines are met while avoiding conflicts between the concurrent transmissions. Most of the proposed centralized scheduling schemes address the link scheduling problem considering multiple possible paths between source and destination. When focusing on a single path, most of these schemes follow the concepts defined by the link scheduling schemes reported in [15] or [16]; these two schemes will hence be considered as reference schemes in this study.

The centralized link scheduling scheme presented in [15] assigns consecutively all the links to be utilized at each hop of a path. This includes the initial link to transmit the message from one node to the next one in the path, and the additional link for a potential retransmission of the message should the first transmission fail. This scheme is hence referred to as HbH (Hop by Hop). To illustrate its operation, we consider the example depicted in Fig. 1a. The example represents a main path of three hops between the source and destination nodes (the number of hops is represented by the variable  $H$ ). WirelessHART indicates that two links should be assigned to each hop in the main path between source and destination. Following this requirement, Fig. 1b represents the scheduling of links resulting from the application of HbH. The first link is assigned for the initial transmission of the message, and the second one for its potential retransmission should the initial transmission fail. In this case, the transmission of a message from

node A to node B will utilize the first link  $l_1$ . The following link  $l_2$  is reserved for the possible retransmission of the same message from node A to node B in case the initial transmission was not successfully received at node B. Following the same principle, the following two links are reserved for the hop between node B and node C and so on. The scheme presented in [15] successfully delivers the message to the destination node as long as the number of transmission errors per hop is smaller than the number of links reserved to each hop. However, the sequential programming of all the links assigned to each hop increases the latency even in the absence of transmission errors.

An alternative scheme is presented in [16]; the scheme is here referred to as RTE. The scheme first assigns the links for the initial transmission of a message at each hop, and then the links for the possible retransmissions. Considering the example depicted in Fig. 1a, RTE assigns the first link  $l_1$  to the transmission of a message from node A to node B (Fig. 1c). Link  $l_2$  is assigned for the transmission of the same message from node B to node C and so on. Links  $l_4, l_5$  and  $l_6$  are then reserved for possible retransmissions of the message from node A to node B, from node B to node C, and from node C to node D respectively. This scheme reduces the time to deliver a message in the absence of transmission errors, but also the reliability in the delivery of the message to the destination node. For example, if the transmission of the message from node A to node B using  $l_1$  fails, links  $l_2$  and link  $l_3$  cannot be utilized since the retransmission of the message from node A to node B (link  $l_4$ ) is programmed after  $l_2$  and  $l_3$ . If the retransmission using  $l_4$  is successful, nodes B and C will only have one attempt each (using links  $l_5$  and  $l_6$ ) to successfully transmit the message to node D.

The schemes reported in [15] and [16] offer advantages in terms of reliability or latency. However, as pointed out in [6], the capacity to jointly guarantee end-to-end reliability and latency for critical industrial applications is still an open research problem. This paper progresses in this direction with the proposal of a novel link scheduling scheme that exploits the advantages of the schemes reported in [15] and [16] while avoiding their drawbacks. The proposed scheme is based on a centralized network management, and is hence particularly suited for industrial wireless sensor networks such as WirelessHART. The

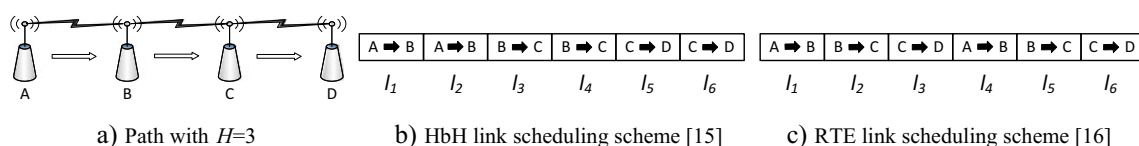


Fig. 1 Centralized scheduling schemes

proposed scheme centrally assigns shared links to nodes that are part of the same path. However, the decision on which nodes should use a shared link at each point in time is distributed. In particular, the scheme proposes that transmitted messages act as virtual tokens to identify which node should utilize each shared link at each point in time based on the quality of previous transmissions. This hybrid (centralized and decentralized) approach provides the capacity to adapt the scheduling and utilization of links to the actual link quality conditions. This allows reducing the latency while maintaining the high reliability levels required by industrial applications. As it will be later shown, it also results in a more efficient use of resources (links and energy).

### 3 Proposed link scheduling scheme

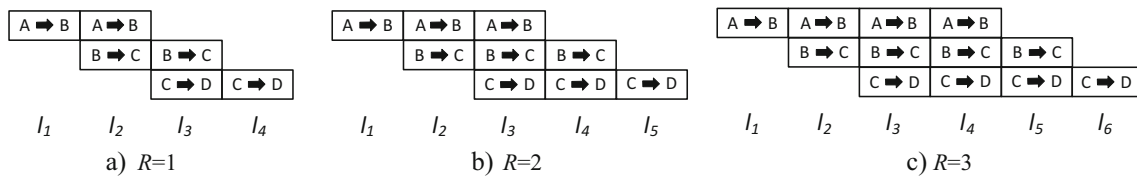
The proposed link scheduling scheme assigns links with certain flexibility in order to reduce the latency and increase the reliability in a path or multi-hop route. To this aim, the scheme proposes the use of shared links and the use of messages as virtual tokens. The scheme is referred to as LIKUID (LIInK schedUIInG scheme with shareD links and virtual tokens). To explain its operation, let's consider the scenario illustrated in Fig. 1a. and define  $R$  as the total number of message retransmissions allowed for the complete path by the proposed scheme. At the start of a transmission, all nodes in a path are in reception mode except for the source node<sup>1</sup>. The nodes should remain in reception mode for the following  $R$  links until they correctly receive the message that needs to be routed to the destination node. When a node correctly receives the message, it transmits it to the next node in the multi-hop route. The source node is assigned  $R + 1$  links to transmit the message, and the destination node  $R + 1$  links to receive the message. All relay nodes in a path (i.e. nodes B and C in Fig. 1a) are assigned  $R + 2$  links to receive and transmit the message as illustrated in Fig. 2. A relay node cannot utilize any of the assigned links for transmission until it has correctly received the message from the predecessor node. Each hop in the path shares  $R$  links with its predecessor hop. Figure 2 shows how LIKUID assigns the different links for the scenario of Fig. 1a with  $H = 3$  hops in the path and a total number of message retransmissions allowed for the complete path ( $R$ ) equal to 1, 2 and 3. The figure shows that LIKUID assigns for the complete path 4, 5 or 6 links in total when  $R$  is equal to 1, 2 and 3 respectively. If  $R = H$ , LIKUID

utilizes the same number of links than HbH and RTE. However, if  $R < H$ , LIKUID assigns and utilizes in total less links than HbH and RTE. LIKUID differs from these two schemes in that all links (except the first and the last ones) are shared by various nodes; e.g.  $l_3$  is shared for the potential transmission of the message by nodes A, B or C when  $R > 1$ . However, a single node will be able to transmit at a given point in time the message over a shared link, and the message acts as a virtual token to identify which node can transmit over the shared link. To illustrate this concept, let's consider an example when  $R$  is equal to 3. Let's suppose that the first transmission of the message from node A to node B using  $l_1$  is erroneous. In this case,  $l_2$  is also utilized for the transmission of the message from node A to node B (i.e. node B remains in reception mode and does not utilize the link for the transmission to node C). If the second transmission is correct, node B uses  $l_3$  to transmit the message to node C while nodes C and D are in reception mode<sup>2</sup>. The process continues until the message is received by the destination node or the total number of message retransmissions allowed for the complete path ( $R$ ) is reached.

LIKUID can ensure the reliable delivery of a message to a destination node as long as the sum of transmission errors in all hops of the path is equal or smaller than the total number of message retransmissions allowed for the complete path ( $R$ ). This property is independent of the specific hops in which the transmission errors take place. LIKUID provides each node with up to  $R + 1$  links to guarantee the reliable delivery of a message and ensures the absence of packet collisions. In addition, LIKUID can deliver a message to the destination node in the time equivalent to  $H$  links if no transmission errors occur ( $H$  is the number of hops in the path). The same latency is ensured in an error-free environment by RTE. However, this scheme can only ensure the correct delivery of the message to the destination node if the total number of transmission errors is smaller than the number of links assigned for transmission to each node. HbH requires more time to deliver a message to the destination in the absence of transmission errors than LIKUID and RTE. In addition, HbH can only ensure the correct delivery of a message to the destination node if the number of transmission errors per hop is smaller than the total number of links (including retransmissions) assigned to each hop for the transmission of a message. LIKUID can also minimize the time to deliver a message to the destination node under the presence of transmission errors. This is the case

<sup>1</sup> Each node gets into reception mode in a different link. For example, node B gets into reception mode in  $l_1$ , while C and D do it in  $l_2$  and  $l_3$  respectively.

<sup>2</sup> If the second transmission would have been erroneous, node A will have tried for the third time the transmission of the message to node B using  $l_3$ . If this transmission would have been correct, then node B would have transmitted the message to node C using  $l_4$ .



**Fig. 2** LIKUID's link scheduling for a path with 3 hops when  $R$  is equal to 1, 2 and 3

because it does not delay retransmissions, and these can take place (using the message as virtual token) as soon as the transmission error is detected. RTE cannot minimize the time to deliver a message since retransmissions need to wait for a total of  $H$  links. LIKUID also maximizes the reliability for a given number of links ( $H + R$ ) assigned to a path or multi-hop route. This is the case because LIKUID can deliver the message to the destination node as long as the number of transmission errors is equal or smaller than  $R$  ( $R$  is equal for LIKUID to the total number of retransmissions allowed for the complete path). If there are  $R + 1$  errors or more, no scheme with  $H + R$  links could deliver the message to the destination since it will need  $H + R + 1$  transmissions.

The proposed scheme can be used in existing wireless industrial standards, in particular in WirelessHART and ISA100.11a. The scheme satisfies the WirelessHART requirements and should be utilized for the main path between source and destination nodes. This is the case because the WirelessHART standard only requires assigning links for possible retransmissions to the main path (such assignment is not mandatory for alternative paths). In this context, this study focuses on such main path and does not consider alternative paths. Such alternative paths would operate identically for all the schemes under study, and therefore the consideration or not of alternative paths does not affect the outcome of the present comparison study.

### 4 Metrics

The performance and efficiency of the different link scheduling schemes is evaluated using different metrics. Their reliability is measured using the end-to-end Packet Delivery Ratio ( $PDR_{E2E}$ ). This metric is computed as the ratio between the messages correctly received at the destination node and the total number of messages transmitted by the source node.

The end-to-end delivery delay is another critical performance metric in industrial wireless sensor networks. This metric ( $D_{E2E}$ ) is here estimated as the average number of links elapsed between the transmission of a message by the source node and its reception at the

destination node. Without loss of generality, this study considers that all links utilized for the transmission of a message are allocated consecutively in a data superframe following the scheduling process defined by each scheme. The  $D_{E2E}$  metric is computed considering only the messages that are correctly received at the destination node.

This study defines several metrics to analyze how efficiently each scheduling scheme utilizes the available links. The first one is the number of total links that are assigned by each scheme for the complete path or multi-hop route. The more efficient schemes will be those that achieve a given reliability level assigning a smaller total number of links for the complete path. The second efficiency metric is the average percentage of links that have been utilized. This metric is estimated as the ratio between the number of links utilized for the transmission of a message in a multi-hop route and the total number of links assigned for such route. It is important noting that certain scheduling schemes can result in that many links are actually not utilized even when the message cannot reach the destination node. This depends on how links have been assigned and on the distribution of transmission errors in the route. The third efficiency metric is the number of blocked links defined as the number of links during which a node has to be in transmission or reception mode for each message that is transmitted from source to destination. It is important noting that a node can only simultaneously utilize (either for transmission or reception) a single link. As a result, when a link is assigned to a given node, the node cannot utilize other links for other functions (e.g. transmitting a message to a different node). The fourth metric is the number of Unnecessary Reception Attempts (URA). This metric computes the number of times that a node was unnecessarily in reception mode for each message successfully delivered to the destination node. This can occur for example if a message that is being transmitted is not addressed to the node that is in reception mode, or simply because no message is being transmitted in the link during which the node is in reception mode. These circumstances clearly represent inefficiencies as the node could have been in sleep mode or undertaking other more productive tasks.

Finally, this study also evaluates the energy consumption of the different link scheduling schemes. The energy

consumption is here estimated as the average energy consumed per message correctly received at the destination node ( $E_{PMD}$ ). This metric has been selected instead of the total energy consumption in order to reduce the influence of the  $PDR_{E2E}$  on the analysis of the energy efficiency<sup>3</sup>.

### 5 Analytical performance modeling

This section presents analytical performance models for the different link scheduling schemes. In particular, it presents analytical expressions of the reliability and latency performance. These expressions have been obtained for a path or multi-hop route with  $H$  hops between the source and destination nodes. The expressions have been derived for HbH and RTE considering that two links are assigned per hop. The expressions for LIKUID have been derived when  $R$  is set equal to 1, 2 and 3.

#### 5.1 Reliability

Let's denote  $PDR_i$  as the PDR estimated for hop  $i$ . If we consider a stationary PDR at each hop,  $PDR_{E2E}$  can be estimated analytically.

HbH assigns all the links to a given hop (including links for retransmissions) before the links for the following hop. The probability  $P_i$  to correctly transmit a message in hop  $i$  (whether using the first assigned link to this hop or the link assigned for retransmissions) can be expressed as:

$$P_i = 1 - (1 - PDR_i)^{L_i} \tag{1}$$

where  $L_i$  represents the number of links assigned to hop  $i$  (two links per hop are considered in this study). Let's consider that the  $PDR_i$  experienced at each hop of the path is independent of each other. In this case, it is possible to estimate  $PDR_{E2E}$  for HbH using (1):

$$PDR_{E2E}|_{HbH} = \prod_{i=1}^H P_i = \prod_{i=1}^H (1 - (1 - PDR_i)^2) \tag{2}$$

RTE assigns first the links for the initial transmission of a message at each hop, and then the links for the potential retransmissions. Let's define  $P_{0-rtx}$  as the probability that the

message reaches the destination node without requiring any retransmissions in the path from source to destination.  $P_{0-rtx}$  can be expressed as:

$$P_{0-rtx} = \prod_{i=1}^H PDR_i \tag{3}$$

Let's define  $P_{rtx-h}$  as the probability that the message reaches the destination node following a retransmission of the message in hop  $h$ .  $P_{rtx-h}$  can be expressed as:

$$P_{rtx-h} = (1 - PDR_h) \cdot \prod_{i=1}^H PDR_i \tag{4}$$

where  $(1 - PDR_h)$  represents the probability that the message is first not correctly transmitted in hop  $h$  and a retransmission is necessary. We can compute the probability  $P_{1-rtx}$  that the message is correctly received at the destination node after a single retransmission at any of the  $H$  hops of the path. This probability is equal to the sum of the  $P_{rtx-h}$  probabilities for all the  $H$  hops in the path:

$$P_{1-rtx} = \sum_{h=1}^H P_{rtx-h} = \left( \prod_{i=1}^H PDR_i \right) \cdot \left( \sum_{i=1}^H (1 - PDR_i) \right) \tag{5}$$

$PDR_{E2E}$  can then be estimated for RTE as<sup>4</sup>:

$$PDR_{E2E}|_{RTE} = P_{0-rtx} + P_{1-rtx} = \left( \prod_{i=1}^H PDR_i \right) + \left( \prod_{i=1}^H PDR_i \right) \cdot \left( \sum_{i=1}^H (1 - PDR_i) \right) = \left( \prod_{i=1}^H PDR_i \right) \cdot \left( 1 + \sum_{i=1}^H (1 - PDR_i) \right) \tag{6}$$

It is possible to obtain for LIKUID an analytical expression of  $PDR_{E2E}$  that is a function of  $R$  (total number of message retransmissions allowed for the complete path). When  $R$  is set equal to one (i.e. only one retransmission is allowed), the message is delivered to the destination node if there are no transmission errors ( $P_{0-rtx}$  in Eq. (3)) or there is only one transmission error ( $P_{1-rtx}$  in Eq. (5)). The  $PDR_{E2E}$  of LIKUID when  $R$  is equal to one is then the sum of  $P_{0-rtx}$  and  $P_{1-rtx}$ , and its value is represented by Eq. (6). When  $R$  is set

<sup>3</sup> For example, if a scheme delivers very few messages to the destination node, it will consume less energy than a scheme that delivers most of the messages to the destination since fewer transmissions will take place.

<sup>4</sup> It is important to remember that when RTE is configured with two links per hop, it will not be able to deliver the message to the destination node if there are more than two transmission errors.



equal to 2, the message can also be delivered to the destination node if there are two retransmissions in total (independently of the hop in which they take place). Following the same process used to define  $P_{1-rtx}$ , we can compute the probability  $P_{2-rtx}$  that the message is correctly received at the destination node after two retransmissions:

$$P_{2-rtx} = \left( \prod_{i=1}^H PDR_i \right) \cdot \left( \sum_{i=1}^H \sum_{j=i}^H (1-PDR_i) \cdot (1-PDR_j) \right) \quad (7)$$

Following the same process, we can also estimate  $P_{3-rtx}$ :

$$P_{3-rtx} = \left( \prod_{i=1}^H PDR_i \right) \cdot \left( \sum_{i=1}^H \sum_{j=i}^H \sum_{k=j}^H (1-PDR_i) \cdot (1-PDR_j) \cdot (1-PDR_k) \right) \quad (8)$$

Finally, the  $PDR_{E2E}$  for LIKUID can then be expressed as function of  $R$  following Eq. (9):

$$PDR_{E2E}|_{LIKUID} = \begin{cases} P_{0-rtx} + P_{1-rtx} = \left( \prod_{i=1}^H PDR_i \right) \cdot \left( 1 + \sum_{i=1}^H (1-PDR_i) \right) & \text{if } R = 1 \\ P_{0-rtx} + P_{1-rtx} + P_{2-rtx} = \left( \prod_{i=1}^H PDR_i \right) \cdot \left( 1 + \left( \sum_{i=1}^H (1-PDR_i) \right) + \left( \sum_{i=1}^H \sum_{j=i}^H (1-PDR_i) \cdot (1-PDR_j) \right) \right) & \text{if } R = 2 \\ P_{0-rtx} + P_{1-rtx} + P_{2-rtx} + P_{3-rtx} = \left( \prod_{i=1}^H PDR_i \right) \cdot \left( 1 + \left( \sum_{i=1}^H (1-PDR_i) \right) + \left( \sum_{i=1}^H \sum_{j=i}^H (1-PDR_i) \cdot (1-PDR_j) \right) + \left( \sum_{i=1}^H \sum_{j=i}^H \sum_{k=j}^H (1-PDR_i) \cdot (1-PDR_j) \cdot (1-PDR_k) \right) \right) & \text{if } R = 3 \end{cases} \quad (9)$$

### 5.2 Latency

If we consider again that the PDR experienced at each hop  $i$  ( $PDR_i$ ) is stationary, it is possible to derive  $D_{E2E}$  analytically as a function of the number  $H$  of hops between the source and destination nodes.

HbH assigns consecutively all the links to be utilized at each hop of a path. The links assigned to the final hop are then placed at the end. The  $D_{E2E}$  metric can be computed for HbH as the sum of two delay components  $D_0$  and  $D_1$ .  $D_0$  is the end-to-end delay experienced when the message reaches the destination node without needing a retransmission at the last hop.  $D_1$  is the end-to-end delay experienced when the message reaches the destination node after a retransmission at the last hop.  $D_0$  is obtained by multiplying the probability that the message reaches the last relay node by the probability that the message correctly reaches the destination node without needing a retransmission at the last hop ( $PDR_H$ ) and by the corresponding delay  $(2(H-1) + 1)$ . The result of this multiplication is then divided by  $PDR_{E2E}$  to obtain  $D_0$ .  $D_1$  is obtained multiplying the probability that the message reaches the last relay node by the probability that the message correctly reaches the destination node after a retransmission at the last hop ( $PDR_H$ ) and by the corresponding delay  $2H$ . The result of this

multiplication is then divided by  $PDR_{E2E}$  to obtain  $D_1$ . The  $D_{E2E}$  metric can then be expressed as:

$$D_{E2E}|_{HbH} = D_0 + D_1 = \frac{\left( \prod_{i=1}^{H-1} (1-(1-PDR_i)^2) \right) \cdot PDR_H \cdot (2 \cdot (H-1) + 1)}{\prod_{i=1}^H (1-(1-PDR_i)^2)} + \frac{\left( \prod_{i=1}^{H-1} (1-(1-PDR_i)^2) \right) \cdot (1-PDR_H) \cdot PDR_H \cdot (2 \cdot H)}{\prod_{i=1}^H (1-(1-PDR_i)^2)} \quad (10)$$

It is possible to simplify Eq. (10) and obtain a  $D_{E2E}$  metric for HbH that only depends on  $PDR_H$  and  $H$ :

$$D_{E2E}|_{HbH} = \frac{PDR_H \cdot (2 \cdot (H-1) + 1)}{(1-(1-PDR_H)^2)} + \frac{(1-PDR_H) \cdot PDR_H \cdot (2 \cdot H)}{(1-(1-PDR_H)^2)} = \frac{PDR_H \cdot ((2 \cdot (H-1) + 1) + (1-PDR_H) \cdot (2 \cdot H))}{(1-(1-PDR_H)^2)} \quad (11)$$

The  $D_{E2E}$  metric for RTE can be expressed as follows:

$$\begin{aligned}
 D_{E2E}|_{RTE} &= \frac{P_{0-rtx} \cdot H}{PDR_{E2E}|_{RTE}} + \frac{P_{1-rtx} \cdot 2 \cdot H}{PDR_{E2E}|_{RTE}} \quad (12) \\
 &= \frac{\left( \prod_{i=1}^H PDR_i \right) \cdot H + \left( \prod_{i=1}^H PDR_i \right) \cdot \left( \sum_{i=1}^H (1-PDR_i) \right) \cdot (2 \cdot H)}{\left( \prod_{i=1}^H PDR_i \right) \cdot \left( 1 + \left( \sum_{i=1}^H (1-PDR_i) \right) \right)} \\
 &= \frac{\left( H + (2 \cdot H) \cdot \left( \sum_{i=1}^H (1-PDR_i) \right) \right)}{\left( 1 + \left( \sum_{i=1}^H (1-PDR_i) \right) \right)}
 \end{aligned}$$

The first term in Eq. (12) is equal to the probability  $P_{0-rtx}$  (Eq. (3)) multiplied by the related delay ( $H$ ) and divided by  $PDR_{E2E}$ . The second term is equal to the probability  $P_{1-rtx}$  (Eq. (5)) multiplied by the corresponding delay ( $2H$ ) and divided by  $PDR_{E2E}$ .

The  $D_{E2E}$  metric for LIKUID can be obtained as the sum of  $R + 1$  terms:

$$D_{E2E}|_{LIKUID} = \begin{cases} \frac{H \cdot P_{0-rtx} + (H + 1) \cdot P_{1-rtx}}{PDR_{E2E}|_{LIKUID(R=1)}} = \frac{\left( \prod_{i=1}^H PDR_i \right) \cdot H + \left( \prod_{i=1}^H PDR_i \right) \cdot \left( \sum_{i=1}^H (1-PDR_i) \right) \cdot (H + 1)}{\left( \prod_{i=1}^H PDR_i \right) \cdot \left( 1 + \sum_{i=1}^H (1-PDR_i) \right)} = \frac{\left( H + (H + 1) \cdot \left( \sum_{i=1}^H (1-PDR_i) \right) \right)}{\left( 1 + \sum_{i=1}^H (1-PDR_i) \right)} & \text{if } R = 1 \\ \frac{H \cdot P_{0-rtx} + (H + 1) \cdot P_{1-rtx} + (H + 2) \cdot P_{2-rtx}}{PDR_{E2E}|_{LIKUID(R=2)}} = \frac{\left( H + (H + 1) \cdot \left( \sum_{i=1}^H (1-PDR_i) \right) + \left( (H + 2) \cdot \sum_{i=1}^H \sum_{j=i}^H (1-PDR_i) \cdot (1-PDR_j) \right) \right)}{\left( 1 + \left( \sum_{i=1}^H (1-PDR_i) \right) + \left( \sum_{i=1}^H \sum_{j=i}^H (1-PDR_i) \cdot (1-PDR_j) \right) \right)} & \text{if } R = 2 \end{cases} \quad (13)$$

When  $R$  is equal to 1, the first term in Eq. (13) results from the multiplication of the probability  $P_{0-rtx}$  (Eq. (3)) by the corresponding delay ( $H$ ) divided by  $PDR_{E2E}$ . The second term in Eq. (13) results from the multiplication of the probability  $P_{1-rtx}$  (Eq. (5)) by the corresponding delay ( $H + 1$ ) divided by  $PDR_{E2E}$ . When  $R$  is equal to 2,  $D_{E2E}$  is obtained summing a third term that is the result of multiplying the probability  $P_{2-rtx}$  by its corresponding delay ( $H + 2$ ) divided by  $PDR_{E2E}$ . The same process is followed to obtain  $D_{E2E}$  for higher values of  $R^5$ .

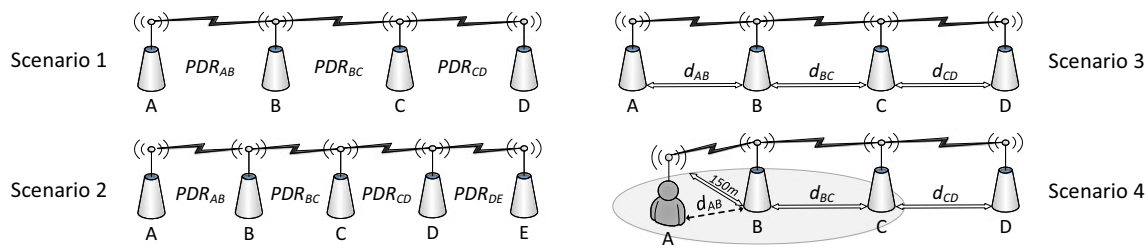
### 6 Performance evaluation

The performance of the proposed link scheduling scheme is compared against that obtained with HbH and RTE. We also consider a fourth simple scheduling scheme that does not consider retransmissions. This scheme, referred to as NoRtx, only needs to assign one link to each hop in a path. Its evaluation is here included to highlight the impact of retransmissions.

<sup>5</sup> When  $R$  is equal to 3, we will need to add an additional term that results from the multiplication of  $P_{3-rtx}$  (Eq. (8)) by its corresponding delay ( $H + 3$ ) divided by  $PDR_{E2E}$ . The  $D_{E2E}$  expression is not shown here due to its complexity.

All schemes are analyzed under the four multi-hop scenarios depicted in Fig. 3. The four scenarios represent the deployment of nodes along a typical corridor that is characteristic of factories. The reliability and latency performance of the scheduling schemes has been numerically evaluated in scenarios 1 and 2 using the analytical expressions presented in the previous section. On the other hand, the efficiency and energy are obtained through simulations using the Monte Carlo method. The schemes are evaluated (for all the metrics) through simulations in scenarios 3 and 4. To ensure the statistical accuracy of the obtained results, sufficient numerical and simulation runs have been executed in order to achieve a relative error below 1 % for all results in the four scenarios.

The first scenario considers a path or multi-hop route with  $H = 3$  and the same PDR experienced in each hop (i.e.  $PDR_{AB} = PDR_{BC} = PDR_{CD}$ ). The first scenario has been selected to analyze the performance of the proposed schemes under different link quality levels by changing the PDR experienced at each hop. The second scenario extends the number of hops to four, and also considers the same PDR per hop ( $PDR_{AB} = PDR_{BC} = PDR_{CD} = PDR_{DE}$ ). The second scenario has been implemented to investigate the effect of the number hops between source and destination on the performance of the link scheduling schemes. It is important noting that four hops have been selected between source and destination since this is the maximum number of hops recommended by the HART



**Fig. 3** Evaluation scenarios

Communication Foundation for a multi-hop industrial wireless link. The third scenario is used to evaluate the performance of the link scheduling schemes using simulations that represent the link level fluctuations experienced in industrial wireless communications. Such fluctuations are reproduced using an empirically derived radio propagation model for industrial environments. Two distances between nodes (50 and 150 m) have been simulated to account for different average link quality levels. The performance of the different schemes has then been evaluated for all possible eight combinations of distances between nodes for the 3-hop scenario depicted in Figure 3. The fourth scenario considers a mobile node A that moves within the radio coverage of node B<sup>6</sup> following the random waypoint mobility model [17]. This scenario considers that node A always uses node B to transmit messages to the destination node D. In this case, it is not necessary to reprogram the assignment of links as a result of the mobility of node A. In this fourth scenario, the maximum distance between nodes A and B ( $d_{AB}$ ) is set equal to 150 m. Two values (50 and 150 m) have also been considered for the distance between static nodes. The fourth scenario has been implemented to evaluate the link scheduling schemes under variable link quality conditions resulting from the mobility of a node.

For the simulations, all functions that intervene in the link scheduling process have been implemented in Matlab. In particular, the implemented simulation platform includes a radio propagation model for industrial wireless communications, the data link layer, the nodes' mobility and the different link scheduling schemes evaluated. This study assumes that all nodes have been informed by the Network Manager of the route they should use to transmit their data to the destination node.

The schemes have been evaluated considering that the nodes integrate the XDM2510H WirelessHART radio transceiver [18]. The transceiver is powered with 3.6 V, and has a power consumption of 18 and 6 mA when it is in transmission and reception mode, respectively. Its transmission power is 8 dBm and its receiver sensibility is equal to -90dBm. The energy consumption is computed considering that nodes transmit messages of 133 Bytes, and that the correct or

incorrect reception of a message in each hop is acknowledged with a message of 26 Bytes.

Radio propagation conditions in scenarios 3 and 4 have been simulated using the model presented in [19] for industrial environments. The model considers one-slope path-loss, and models the fading effects at 2.4 GHz. Some of the model parameters are:  $d_0 = 15$  m (reference distance),  $PL(d_0) = 71.84$  dBm (path-loss at  $d_0$  distance),  $n = 2.16$  (path-loss exponent),  $\sigma = 8.13$  dBm (shadowing standard deviation) and  $Gt = Gr = 0$  dB (transmitter and receiver antenna gains). In this study, we consider that a message is correctly received if the RSSI (Received Signal Strength Indicator) is above -90 dBm. It is important noting that, as required by WirelessHART, no packet collisions can occur with the four scheduling schemes under evaluation.

### 6.1 Validation of analytical expressions

The reliability and latency evaluation under scenarios 1 and 2 are conducted using the analytical expressions presented in Section 5. It is then important to validate these expressions by comparing the results obtained when using the analytical expressions of  $PDR_{E2E}$  and  $D_{E2E}$  and when estimating these metrics through simulations. Figure 4 depicts such comparison<sup>7</sup> when considering the first scenario represented in Fig. 3 and  $R$  is set equal to 1, 2, 3 and 4 (in this case, we refer to LIKUID as LIKUID<sub>1</sub>, LIKUID<sub>2</sub>, LIKUID<sub>3</sub>, and LIKUID<sub>4</sub> respectively). The figure shows for all schemes a close match between the results obtained using the analytical expressions (*Ana*) and using simulations (*Sim*). These results validate the derived analytical expressions.

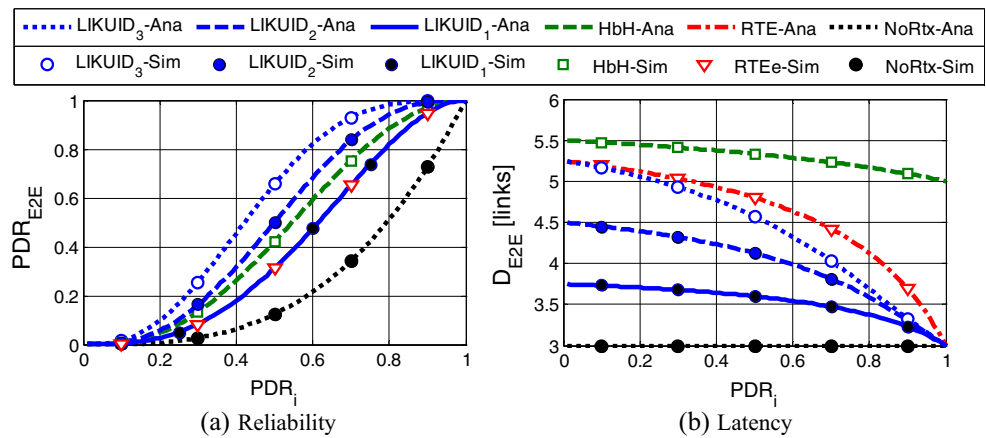
### 6.2 Scenario 1

Figure 4a depicts the probability that a message is correctly received by the destination node ( $PDR_{E2E}$ ) as a function of the PDR experienced at each hop ( $PDR_i$ ). These results have been obtained for the first evaluation scenario (Fig. 3) that considers a path or multi-hop route with  $H = 3$  and  $PDR_{AB} = PDR_{BC} = PDR_{CD}$ . Results for LIKUID are shown for  $R = 1$  (LIKUID<sub>1</sub>),  $R = 2$  (LIKUID<sub>2</sub>) and  $R = 3$  (LIKUID<sub>3</sub>). It

<sup>6</sup> This restriction aims to represent the fact that in factories, the mobility of nodes is generally limited to their working environment, e.g. workers usually move around the machinery they manipulate.

<sup>7</sup> The results are obtained considering the same  $PDR_i$  value for each hop in the path.

**Fig. 4** Reliability and latency as a function of the  $PDR_i$  for scenario 1



is important remembering that the configuration with  $R=3$  corresponds to the case in which LIKUID utilizes the same total number of links as HbH and RTE in scenario 1 (Table 1). For a path with 3 hops, this total number of links is equal to six (Fig. 2), which is also the minimum number of links necessary for HbH and RTE to allow for possible retransmissions at every hop of the path. LIKUID can allow retransmissions at any hop of the path using a lower total number of links for the complete path. Figure 4 showed that, for example, when LIKUID is configured with  $R=1$ , the total number of links assigned for the path or multi-hop route is equal to four (Table 1). In this case, only one retransmission is allowed for the complete path, but such retransmission can take place at any hop of the path. The results depicted in Fig. 4a show that LIKUID<sub>2</sub> and LIKUID<sub>3</sub> outperform the other schemes for all possible values of  $PDR_i$ . This means that LIKUID can achieve higher  $PDR_{E2E}$  than HbH and RTE even if it assigns one link less (i.e.  $R=2$ ) for the complete path (Table 1). The obtained results also show that decreasing  $PDR_i$  values have a smaller effect on LIKUID than on the other schemes. For example, when  $PDR_i$  is equal to 0.95, LIKUID<sub>3</sub> achieves a  $PDR_{E2E}$  equal to 0.9999, and HbH and RTE a  $PDR_{E2E}$  equal to 0.9925 and 0.9860 respectively. When the  $PDR_i$  decreases to 0.75, LIKUID<sub>3</sub> can maintain a high  $PDR_{E2E}$  (0.9624) while the  $PDR_{E2E}$  for HbH and RTE is significantly degraded to 0.8240 and 0.7383 respectively. Figure 4a also shows that HbH achieves a higher  $PDR_{E2E}$  than RTE. This is the case because HbH allows for a possible retransmission at every hop of the path, while RTE only allows for one retransmission in the complete path. LIKUID<sub>1</sub> ( $R=1$ ) also allows for only one retransmission in the complete path.

**Table 1** Number of total assigned links as a function of the number of hops in the path

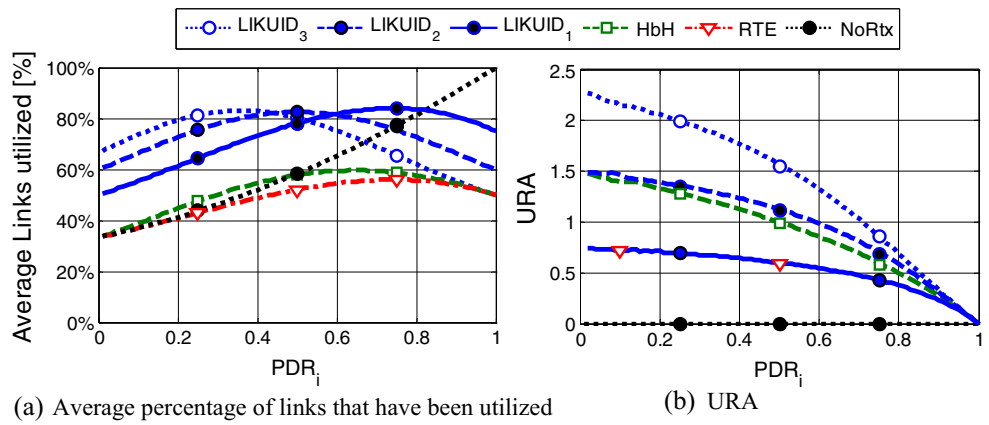
H	LIKUID <sub>4</sub>	LIKUID <sub>3</sub>	LIKUID <sub>2</sub>	LIKUID <sub>1</sub>	HbH	RTE	NoRtx
3	–	6	5	4	6	6	3
4	8	7	6	5	8	8	4

However, it only assigns 4 links compared to the 6 links assigned by RTE (Table 1). The poor reliability performance achieved by NoRtx emphasizes the importance of retransmissions to ensure high  $PDR_{E2E}$  results.

Figure 4b represents the end-to-end delivery delay ( $D_{E2E}$ ) that is estimated as the average number of links elapsed between the transmission of a message by the source node and its reception at the destination node. It is important remembering that  $D_{E2E}$  is computed considering only the messages correctly received by the destination node. As a result, the delay results have to be discussed taking into account the  $PDR_{E2E}$  achieved by each scheme. Figure 4b shows that HbH experiences the higher delivery delay  $D_{E2E}$ . This is the case because HbH can only deliver the message to the destination node at  $l_5$  even if there are no transmission errors, whereas all the other schemes can do so at  $l_3$ . The minimum possible delay  $D_{E2E}$  is hence equal to 5 for HbH, and equal to 3 for all other schemes. NoRtx has a delay always equal to 3 since retransmissions are not allowed and only received messages at the destination node are taken into account when computing  $D_{E2E}$ . However, NoRtx exhibits a poor  $PDR_{E2E}$  performance (Fig. 4a), in particular under low  $PDR_i$  values. As it would be expected, RTE reduces the delay compared to HbH. However, RTE increases the delay compared to all the configurations of the LIKUID proposal, including the one that utilizes the same total number of links as RTE (i.e. LIKUID<sub>3</sub>). Figure 4 shows that LIKUID<sub>1</sub> can significantly reduce the delay compared to PbP even if both schemes achieve the same reliability levels. LIKUID<sub>2</sub> and LIKUID<sub>3</sub> increase the ratio of messages delivered to the destination node compared to HbH and RTE, and they do so while reducing the time to deliver them. These results clearly demonstrate that using shared links and virtual tokens can reduce unnecessary waiting times at intermediate hops and increase the reliability at each hop of the path. Of particular relevance are the results obtained with LIKUID<sub>2</sub>. This configuration can increase the  $PDR_{E2E}$  and decrease the  $D_{E2E}$  (compared to HbH and RTE) while reducing the total number of links assigned to a complete path or



**Fig. 5** Average percentage of links that have been utilized and Unnecessary Reception Attempts (URA) as a function of the  $PDR_i$  for scenario 1



multi-hop route (Table 1). The released link can be utilized for other purposes including augmenting the number of programmed paths or increasing their  $PDR_{E2E}$ .

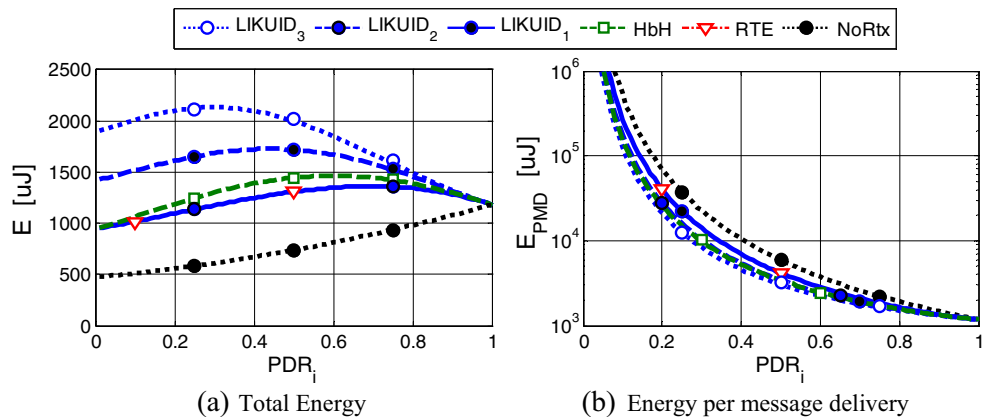
Figure 5a represents the average percentage of links that have been utilized for the transmission of a message as a function of the  $PDR_i$ . The depicted results show that LIKUID always operates more efficiently than HbB and RTE as it achieves a higher average utilization of the assigned links for all the evaluated  $PDR_i$  values. A joint analysis of the results in Figs. 4 and 5 reveals some interesting findings. Existing schemes (HbH, RTE and NoRtx) exhibit a low utilization of links (around 33 %) when operating under low  $PDR_i$  values (between 0 and 0.2). Such utilization level indicates that few messages are delivered to the destination node, and few actually even reach the second hop of the path. LIKUID increases significantly the utilization level under low  $PDR_i$  values (Fig. 5a), but this does not have a significant impact on the  $PDR_{E2E}$  (Fig. 4a). Figure 5a also shows that LIKUID can increase the average percentage of links that have been utilized under high  $PDR_i$  values (between 0.9 and 1) when using a smaller total number of links for the complete path (i.e. LIKUID<sub>1</sub> has higher utilization level than LIKUID<sub>2</sub> and LIKUID<sub>3</sub>). This is the case because under good radio link quality conditions, messages do not generally require retransmissions to reach the destination

node. The links reserved for such retransmissions are therefore rarely utilized.

Figure 5b depicts the number of Unnecessary Reception Attempts (URA) for each message successfully delivered to the destination as a function of the  $PDR_i$ . Previous results have clearly demonstrated the significant reliability and latency benefits of LIKUID. However, such benefits come at the expense of increasing the URA under low  $PDR_i$  values, and in particular when utilizing the same total number of links as HbH, RTE or NoRtx (i.e. LIKUID<sub>3</sub>). A higher number of retransmissions take place in the first hops of the path when experiencing low  $PDR_i$  values. In this case, nodes close to the destination node will unnecessarily be in reception mode for a larger number of links. This drawback is mitigated as the  $PDR_i$  augments and URA decreases. Also, the URA can be decreased for LIKUID by reducing the total number of links assigned to a complete path or multi-hop route. For example, LIKUID<sub>2</sub> experiences the same URA levels as HbH while increasing  $PDR_{E2E}$  and reducing  $D_{E2E}$ .

The total energy consumption ( $E$ ) is shown in Fig. 6a as a function of the  $PDR_i$ . The total energy consumption varies with the  $PDR_i$ , but all algorithms converge to the same energy consumption value (approximately 1180  $\mu$ J) when the  $PDR_i$  is equal to 1. Significant differences are observed under low  $PDR_i$  values. In particular, Fig. 6a shows that LIKUID<sub>3</sub>

**Fig. 6** Total energy consumption and average energy consumed per message correctly received at the destination node as a function of the  $PDR_i$  for scenario 1



increases the energy consumption. However, LIKUID<sub>3</sub> is the scheme achieving the highest  $PDR_{E2E}$  levels (Fig. 4a), and reliability is the most critical aspect in industrial applications. The high energy consumption levels characterizing LIKUID are due to two main factors. The first one is the fact that LIKUID achieves the highest  $PDR_{E2E}$ . The higher the packet delivery ratio, the more messages are transmitted, and therefore more energy is consumed for their transmission. The second factor is related to the higher URA values measured with LIKUID (Fig. 5b), and that result from the fact that intermediate nodes must be in reception mode in case a message is sent to them (virtual token concept). Although this has a cost in terms of URA and energy consumption, it provides LIKUID with higher flexibility. Such flexibility is at the origin of the reliability and latency gains achieved by LIKUID with respect to existing schemes. Since the different scheduling schemes result in varying  $PDR_{E2E}$  levels, a more fair comparison of the energy performance is possible if we consider the average energy consumed per message correctly received at the destination node ( $E_{PMD}$ ). Figure 6b represents the  $E_{PMD}$  as a function of  $PDR_i$ . As it could be expected, the higher the  $PDR_i$ , the lower the  $E_{PMD}$  metric since fewer retransmissions are needed. For high  $PDR_i$  values, few differences between the schemes can be observed. The differences appear when operating under low  $PDR_i$  values. In this case, LIKUID<sub>3</sub> results in the lowest  $E_{PMD}$  values. This result demonstrates that although LIKUID<sub>3</sub> increases the total energy consumption as a result of its higher  $PDR_{E2E}$ , it is more efficient than existing schemes.

Finally, Table 2 presents for the first evaluation scenario the number of blocked links defined as the number of links during which a node has to be in transmission or reception mode for each message that is transmitted from source to destination. The number of links during which a node is blocked only depends on the number of hops  $H$ . In this case, the results depicted in Table 2 are valid for the first, third and fourth evaluation scenarios since all of them are characterized by  $H=3$ . LIKUID<sub>3</sub> has the highest number of blocked links. LIKUID<sub>2</sub> only results in one more blocked link at the source and destination nodes compared to HbH and RTE. LIKUID<sub>1</sub> reduces the number of blocked links compared to HbH and RTE (Table 2) and the total number of links assigned to the complete path or multi-hop route (Table 1). It is important noting that LIKUID<sub>1</sub> improved the  $D_{E2E}$  performance

**Table 2** Blocked links ( $H=3$ )

Node	LIKUID <sub>3</sub>	LIKUID <sub>2</sub>	LIKUID <sub>1</sub>	HbH	RTE	NoRtx
A	4	3	2	2	2	1
B	5	4	3	4	4	2
C	5	4	3	4	4	2
D	4	3	2	2	2	1

compared to RTE (Fig. 4), and achieved the same  $PDR_{E2E}$  as HbH and RTE while reducing the total number of links assigned to the complete path (Table 1).

### 6.3 Scenario 2

The second evaluation scenario adds an additional hop in the path with respect to the first scenario (Fig. 3). In this case, HbH and RTE assign two links per hop, and therefore a total of 8 links for the complete path (Table 1). In this scenario, LIKUID<sub>3</sub> only requires 7 links for the complete path. There is one link per hop, and three additional links for possible retransmissions ( $R=3$ ). We have also evaluated in this scenario LIKUID<sub>4</sub> ( $R=4$ ) since this configuration utilizes the same total number of links as HbH and RTE. In general terms, the same performance trends have been observed for scenario 2 as for scenario 1. This section hence focuses on the impact of incrementing the number of hops in the path.

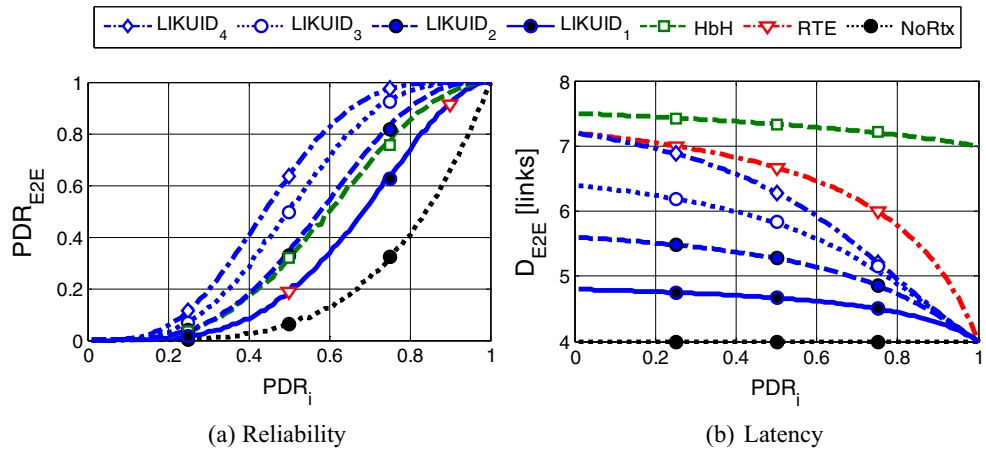
The results in Fig. 7a confirm that LIKUID outperforms HbH and RTE when there are at least two shared links for retransmissions and  $H$  is equal or smaller than 4 (i.e. LIKUID<sub>2</sub>, LIKUID<sub>3</sub> and LIKUID<sub>4</sub> when  $H=4$ )<sup>8</sup>. It is also important noting that the  $PDR_{E2E}$  gains achieved with LIKUID with respect to the other schemes increase with the number of hops. For example, when  $PDR_i$  is equal to 0.95, LIKUID<sub>3</sub> achieves a  $PDR_{E2E}$  of 0.9998 under scenario 2 (similar performance to that achieved under scenario 1 when the  $PDR_{E2E}$  was equal to 0.9999). On the other hand, HbH and RTE see their  $PDR_{E2E}$  performance reduce to 0.9885 and 0.9765 in scenario 2 compared to 0.9925 and 0.9860 respectively under scenario 1. It is also relevant noting that LIKUID<sub>4</sub> increases the  $PDR_{E2E}$  to 0.99998. In comparison, LIKUID<sub>3</sub> achieved a  $PDR_{E2E}$  equal to 0.9999 in scenario 1<sup>9</sup>. Figure 7b shows that similar  $D_{E2E}$  performance trends to those observed under scenario 1 (Fig. 4b) are again experienced under scenario 2, with LIKUID outperforming again HbH and RTE. The delay increases with the number of hops for all link scheduling schemes. However, LIKUID experiences a smaller increase compared to the other schemes. Fig. 7a and b show that even if we reduce the total number of links assigned to the path to 6 (HbH and RTE require 8 links when  $H=4$ ), LIKUID<sub>2</sub> still outperforms HbH and RTE both in terms of reliability and latency.

Few differences with respect to scenario 1 were found when comparing the efficiency of the link scheduling schemes under scenario 2 (Fig. 8). Figure 8 shows that LIKUID increases the average percentage of links that have been utilized under scenario 2 compared to scenario 1. This is the case

<sup>8</sup> In fact, LIKUID always outperforms RTE independently of the number of hops in a path when  $R$  is equal or higher than 2.

<sup>9</sup> LIKUID<sub>4</sub> assigns the same total number of links for the path as HbH and RTE in scenario 2. LIKUID<sub>3</sub> assigned the same total number of links for the path as HbH and RTE in scenario 1.

**Fig. 7** Reliability and latency as a function of the  $PDR_i$  for scenario 2



because there are more shared links for retransmissions. The URA metric also increases under scenario 2 since more nodes participate in the transmission of the message.

The comparison of Figs. 6 and 9 shows that the energy consumption increases with the number of hops. Similar conclusions in terms of energy consumption and efficiency can be reached when comparing the different link scheduling schemes under scenario 2. LIKUID offers the possibility to flexibly utilize the shared links for retransmissions. This has a cost in terms of URA and total energy consumption under low link quality levels. Such cost increases with the number of hops. However, a close look to the energy efficiency ( $E_{PMD}$ ) shows that even if the number of hops increases, LIKUID is still more efficient when evaluating the energy per message correctly received at the destination node. In fact, LIKUID<sub>4</sub> and LIKUID<sub>3</sub> achieve the lowest  $E_{PMD}$  levels.

Tables 2 and 3 show that increasing the number of hops does not have an impact on the number of blocked links per node. The only notable effects are: 1) more intermediate nodes benefit with LIKUID from the reduction in the number of blocked links compared to HbH and RTE when we decrease  $R$ , and 2) increasing the number of possible retransmissions using shared links (i.e. increasing  $R$  from 3 to 4) increases the

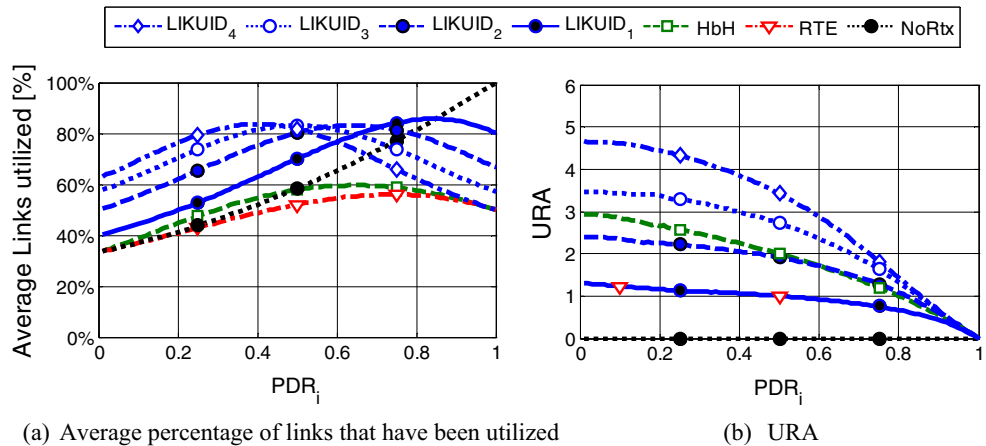
number of blocked links for all nodes in the path. Such increase helps though augment the  $PDR_{E2E}$  and reduce the  $D_{E2E}$  with respect to HbH and RTE.

### 6.4 Scenario 3

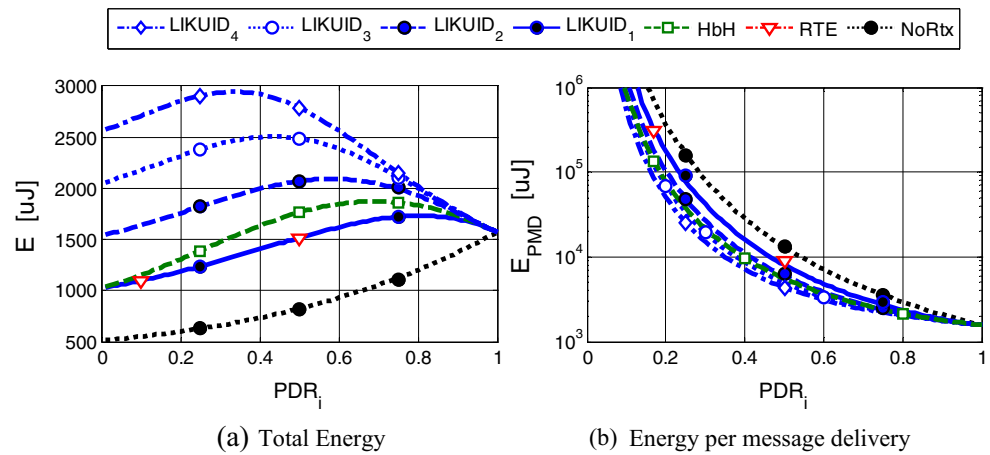
Scenarios 1 and 2 assumed that all hops experience the same  $PDR_i$ . The third scenario simulates a more realistic scenario with variable  $PDR_i$  per hop. The  $PDR_i$  conditions have been simulated using the radio propagation model described in [19] and considering that nodes can be separated by 50 or 150 m. With the simulation conditions reported in Section 6, a distance between nodes of 50 m results in an average PDR equal to 0.953. The average PDR decreases to 0.711 when the distance between nodes increases to 150 m. All possible configurations of distance between hops (eight) have been simulated and evaluated for a path with  $H=3$ . The configurations are referenced with the possible combinations of values for  $[d_{AB}, d_{BC}, d_{CD}]$ .  $d_{AB}$ ,  $d_{BC}$  and  $d_{CD}$  represent the distance between nodes A and B, B and C, and C and D respectively.

Table 4 shows the  $PDR_{E2E}$  obtained for the different schemes and all possible configurations of distance between hops. First of all, it is important highlighting that Table 4

**Fig. 8** Average percentage of links that have been utilized and Unnecessary Reception Attempts (URA) as a function of the  $PDR_i$  for scenario 2



**Fig. 9** Total energy consumption and average energy consumed per message correctly received at the destination node as a function of the  $PDR_i$  for scenario 2



confirms the trends observed under scenarios 1 and 2. Under realistic simulation conditions, LIKUID improves again the reliability compared to existing schemes (HbH and RTE). The results also show that when the path includes at least one long distance hop, LIKUID<sub>3</sub> achieves a  $PDR_{E2E}$  notably higher than the other schemes. LIKUID<sub>2</sub> experiences a slight degradation with respect to LIKUID<sub>3</sub>, but still significantly outperforms HbH and RTE. LIKUID is more robust because it can utilize more links for the long distance hops that experience lower PDR levels. On the other hand, HbH and RTE can only utilize a maximum of two links per hop independently of their link quality. It is also relevant noting that the achieved  $PDR_{E2E}$  depends on the number of long distance hops in the path, but not on their position in the path.

The results depicted in Table 5 also confirm the superior  $D_{E2E}$  performance of LIKUID under realistic simulation conditions. It is interesting to note that the  $D_{E2E}$  achieved with LIKUID<sub>3</sub>, LIKUID<sub>2</sub> and RTE depends on the number of long distance hops in the path (the fewer the number of long distance hops, the smaller the delay). This is the case because each retransmission augments  $D_{E2E}$  for these three schemes independently of the hop for which the retransmission was necessary. On the other hand, the delay performance of HbH does not depend on the number of long distance hops in the path, but mainly on the link quality of the last hop in the path. In fact, only the retransmissions on the last hop of the path increase the  $D_{E2E}$  metric for HbH.

**Table 3** Blocked links ( $H=4$ )

Node	LIKUID <sub>4</sub>	LIKUID <sub>3</sub>	LIKUID <sub>2</sub>	LIKUID <sub>1</sub>	HbH	RTE	NoRtx
A	5	4	3	2	2	2	1
B	6	5	4	3	4	4	2
C	6	5	4	3	4	4	2
D	6	5	4	3	4	4	2
E	5	4	3	2	2	2	1

Table 6 reports the average percentage of links that have been utilized (out of all the assigned links for the path) under scenario 3. We can see that LIKUID<sub>3</sub> utilizes the links similarly to HbH and RTE when there are no long distance hops in the path. When the number of such hops increases, LIKUID<sub>3</sub> augments the utilization of assigned links with respect to HbH and RTE. This means that when the link quality degrades, LIKUID<sub>3</sub> utilizes more the available links to conduct retransmissions, which ultimately benefits its  $PDR_{E2E}$  performance as previously highlighted. The results in Table 6 show that it is actually LIKUID<sub>2</sub> the scheme that results in a higher utilization of the assigned links (10 % more than LIKUID<sub>3</sub>). This is due to the fact that LIKUID<sub>2</sub> has one link less assigned to the complete path compared to LIKUID<sub>3</sub>. In this case, LIKUID<sub>2</sub> needs to do a more intense utilization of the available links to conduct retransmissions when the link quality conditions degrade. However, its capacity to efficiently combat poor link quality conditions decreases with respect to LIKUID<sub>3</sub> as the number of long distance hops in the path increases.

The results depicted in Table 7 show that LIKUID<sub>3</sub> results again in the larger URA. However, the impact of LIKUID on the URA reduces when  $R$  decreases (i.e. LIKUID<sub>2</sub>). Table 7 also shows that URA increases when the long distance hops are located in the first hops of the path. In this case,

**Table 4**  $PDR_{E2E}$  in scenario 3

$[d_{AB}, d_{BC}, d_{CD}]$	LIKUID <sub>3</sub>	LIKUID <sub>2</sub>	HbH	RTE	NoRtx
[50, 50, 50]	0.999	0.999	0.997	0.993	0.902
[50, 50, 150]	0.992	0.972	0.915	0.902	0.665
[50, 150, 50]	0.992	0.972	0.916	0.901	0.665
[150, 50, 50]	0.992	0.971	0.915	0.901	0.665
[150, 150, 50]	0.972	0.921	0.841	0.789	0.491
[150, 50, 150]	0.972	0.921	0.840	0.789	0.491
[50, 150, 150]	0.972	0.921	0.840	0.789	0.491
[150, 150, 150]	0.939	0.853	0.772	0.674	0.362



**Table 5**  $D_{E2E}$  [links] in scenario 3

[ $d_{AB}$ , $d_{BC}$ , $d_{CD}$ ]	LIKUID <sub>3</sub>	LIKUID <sub>2</sub>	HbH	RTE	NoRtx
[50, 50, 50]	3.10	3.10	5.03	3.28	3.00
[50, 50, 150]	3.44	3.39	5.22	3.79	3.00
[50, 150, 50]	3.44	3.39	5.03	3.79	3.00
[150, 50, 50]	3.44	3.39	5.03	3.79	3.00
[150, 150, 50]	3.74	3.61	5.03	4.14	3.00
[150, 50, 150]	3.74	3.61	5.22	4.13	3.00
[50, 150, 150]	3.74	3.61	5.22	4.14	3.00
[150, 150, 150]	3.99	3.79	5.22	4.39	3.00

retransmissions are usually necessary to progress with the transmission of the message towards the destination node. The nodes that are closer to the destination will be unnecessarily in reception mode until such retransmissions are successful. LIKUID increases the utilization of links under scenario 3 in order to accommodate the necessary retransmissions that benefit the final  $PDR_{E2E}$ . Despite these additional retransmissions, Table 8 shows that LIKUID does not increase the average energy per message correctly received at the destination node ( $E_{PMD}$ ). In fact, LIKUID can even slightly decrease  $E_{PMD}$  compared to existing schemes. Table 8 also shows that the reduction in  $E_{PMD}$  achieved with LIKUID compared with the other schemes is higher as the number of long distance hops in the path increases. This is the case because LIKUID increases the number of messages delivered to the destination node, and therefore decreases the energy consumed per delivered message.

### 6.5 Scenario 4

The fourth scenario extends the third scenario and considers that the first node in the path (node A) is a mobile node. In the simulated scenario, node A moves around the coverage area of node B at a speed of 1 m/s and following the *random waypoint* mobility model [17]. The maximum distance between nodes A and B has been set to 150 m. The fourth scenario also

**Table 6** Average percentage of links that have been utilized in scenario 3

[ $D_{AB}$ , $D_{BC}$ , $D_{CD}$ ]	LIKUID <sub>3</sub>	LIKUID <sub>2</sub>	HbH	RTE	NoRtx
[50, 50, 50]	51.7 %	62.1 %	51.6 %	51.6 %	96.7 %
[50, 50, 150]	57.7 %	68.7 %	55.9 %	55.5 %	96.7 %
[50, 150, 50]	57.6 %	68.1 %	54.5 %	54.1 %	88.5 %
[150, 50, 50]	57.5 %	67.7 %	53.1 %	52.7 %	80.0 %
[150, 150, 50]	62.8 %	72.4 %	55.7 %	53.8 %	74.0 %
[150, 50, 150]	63.1 %	73.4 %	56.9 %	55.6 %	80.1 %
[50, 150, 150]	63.2 %	73.9 %	58.3 %	57.0 %	88.5 %
[150, 150, 150]	68.0 %	77.3 %	59.2 %	55.9 %	74.0 %

**Table 7** URA metric in scenario 3

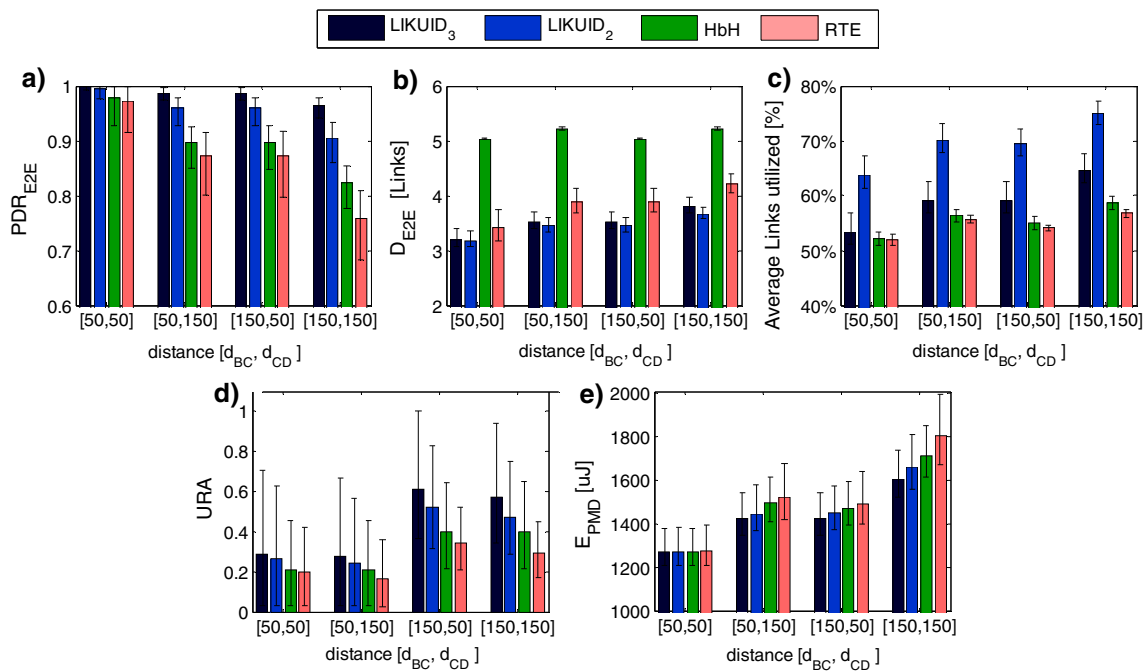
[ $d_{AB}$ , $d_{BC}$ , $d_{CD}$ ]	LIKUID <sub>3</sub>	LIKUID <sub>2</sub>	HbH	RTE	NoRtx
[50, 50, 50]	0.10	0.10	0.10	0.09	0
[50, 50, 150]	0.10	0.10	0.10	0.07	0
[50, 150, 50]	0.44	0.39	0.29	0.26	0
[150, 50, 50]	0.78	0.68	0.48	0.45	0
[150, 150, 50]	1.05	0.87	0.67	0.54	0
[150, 50, 150]	0.73	0.61	0.48	0.38	0
[50, 150, 150]	0.42	0.35	0.29	0.22	0
[150, 150, 150]	0.99	0.79	0.67	0.46	0

considers variable  $PDR_i$  levels at each hop, and distances of 50 or 150 m between nodes B and C, and between nodes C and D.

Figure 10 represents the results obtained for all the metrics under scenario 4. The figure depicts the average values and the 5th and 95th percentiles. Figure 10 demonstrates that the proposed link scheduling scheme outperforms existing solutions even under the presence of mobile nodes. The configuration of LIKUID with  $R$  equal to 3 (LIKUID<sub>3</sub>) achieves the highest  $PDR_{E2E}$  (Fig. 10a) and the smallest  $D_{E2E}$  (Fig. 10b). LIKUID<sub>3</sub> also augments the average utilization of the available links compared to HbH and RTE (Fig. 10c), but increases the URA (Fig. 10d). As it was previously the case, such higher URA is the cost incurred by the scheduling flexibility embedded in LIKUID and that is at the origin of its higher reliability and latency performance. However, LIKUID<sub>3</sub> is again the most efficient scheme for delivering messages to the destination node and results in the lower  $E_{PMD}$  value (Fig. 10e). Similar trends to that reported for scenario 3 are also observed under scenario 4 with a mobile node. In particular, the gains achieved by LIKUID with respect to existing schemes augment when the link quality conditions ( $PDR_i$ ) decrease. For example, LIKUID<sub>3</sub> improves the  $PDR_{E2E}$  with respect to HbH by 2 % under the configuration [50,50]. The improvement increases to 14 % under the configuration [150,150]. LIKUID also experiences a smaller  $PDR_{E2E}$  reduction when the link quality conditions degrade compared to existing

**Table 8**  $E_{PMD}$  [ $\mu$ J] in scenario 3

[ $d_{AB}$ , $d_{BC}$ , $d_{CD}$ ]	LIKUID <sub>3</sub>	LIKUID <sub>2</sub>	HbH	RTE	NoRtx
[50, 50, 50]	1225	1225	1226	1229	1268
[50, 50, 150]	1377	1394	1444	1457	1721
[50, 150, 50]	1388	1398	1422	1434	1590
[150, 50, 50]	1400	1403	1401	1413	1455
[150, 150, 50]	1572	1597	1613	1661	1843
[150, 50, 150]	1566	1603	1634	1700	1972
[50, 150, 150]	1554	1598	1658	1725	2154
[150, 150, 150]	1758	1835	1865	2021	2497



**Fig. 10** Results (average, 5th and 95th percentiles) obtained under scenario 4

schemes. For example, the  $PDR_{E2E}$  performance of LIKUID<sub>3</sub> only decreases by 3.4 % when comparing the best ([50,50] configuration) and worst ([150,150] configuration) link quality conditions. On the other hand, the  $PDR_{E2E}$  performance of HbH and RTE decreases by 15.4 and 21.4 % respectively under the same conditions. The capacity exhibited by LIKUID to combat poor link quality conditions is highly relevant for critical applications, such as the industrial ones, that demand very high reliability levels. The results also show that LIKUID is capable to guarantee high  $PDR_{E2E}$  levels to mobile nodes. So as long as the mobile nodes do not leave the communications range of their connecting nodes, LIKUID does not need to reschedule the links since it can maintain high  $PDR_{E2E}$  levels.

## 7 Conclusions

This paper has presented and evaluated a novel link scheduling scheme for industrial wireless sensor networks with strict reliability and latency requirements. The proposed scheme proposes the use of shared links between nodes that are part of a given path or multi-hop route. The messages transmitted over the route act as a virtual token to identify which node should utilize the shared links at each point in time. The use of shared links and virtual tokens allows for a more flexible use of the available links that can take into account the link quality conditions and the need for retransmissions. The proposed link scheduling scheme is here applied to IWSNs, but it is

important emphasizing that it can be used in other centralized TDMA-based multi-hop wireless networks.

The proposed link scheduling scheme has been thoroughly evaluated and its performance has been compared against existing schemes. To this aim, this paper has presented analytical expressions of the reliability ( $PDR_{E2E}$ ) and latency ( $D_{E2E}$ ) performance that can be used for a first performance estimate. The evaluation has been extended using numerical evaluations and simulations under different scenarios and operating conditions. The obtained results clearly demonstrate that the proposed link scheduling scheme significantly improves the reliability and end-to-end delay of the existing schemes when utilizing the same total number of links assigned to a path or multi-hop route. This trend has been shown to be independent of the number of hops in the route, the link quality conditions per hop, and the presence of mobile nodes in the route. The proposed scheme also efficiently utilizes the available resources. In particular, it increases the utilization of the assigned links and reduces the energy consumed per message correctly delivered to the destination node. All these benefits are obtained at the cost of increasing the number of blocked links and the time a node is unnecessarily in reception mode in case it should receive a message. These drawbacks can be deemed relatively minor considering the reliability and latency gains achieved with the proposed link scheduling scheme. In any case, they can be reduced by decreasing the number of shared links used for retransmissions ( $R$ ). Decreasing  $R$  also reduces the total number of links assigned for a given path or multi-hop route, but it has also an impact on the reliability. The study has also shown

that it is possible to maintain the reliability levels offered by existing schemes such as HbH or RTE while reducing the total number of links assigned to a route (e.g. with LIKUID<sub>1</sub>). In this case, the proposed scheme can free valuable resources that can be used for other functions in the network. The proposed link scheduling scheme is then a valuable solution to improve the reliability and latency in industrial wireless sensor networks with strict application requirements, and to efficiently utilize the available resources (i.e. links or bandwidth and energy).

**Acknowledgments** This work was supported in part by the Spanish Ministry of Economy and Competitiveness and FEDER funds under the project TEC2014-57146-R, and by the Local Government of Valencia with reference ACIF/2013/060.

## References

- Hancke G, Gungor V, Hancke G (2014) Guest editorial special section on industrial wireless sensor networks. *IEEE Trans Ind Inf* 10(1):762–765. doi:10.1109/TII.2013.2280433
- IEC 62591 Ed. 1.0: Industrial communication networks -wireless communication network and communication profiles-WirelessHART™, IEC, 2010
- Wireless Systems for Industrial Automation: Process Control and Related Applications, ISA-100.11a-2009 Standard, 2009
- Dobslaw F, Zhang T, Gidlund M (2014) End-to-end reliability-aware scheduling for wireless sensor networks. *IEEE Trans Ind Inf*. doi:10.1109/TII.2014.2382335, available as early access article
- Carlse PS (2011) Wireless HART versus ISA100.11a: the format war hits the factory floor. *IEEE Ind Electron Mag* 5(4):23–34. doi:10.1109/MIE.2011.943023
- Suriyachai P, Roedig U, Scott A (2012) A survey of MAC protocols for mission-critical applications in wireless sensor networks. *IEEE Commun Surv Tutor* 14(2):240–264. doi:10.1109/SURV.2011.020211.00036
- Sgora A, Vergados DJ, Vergados DD (2015) A survey of TDMA scheduling schemes in wireless multihop networks. *ACM Comput Surv* 47(3):1–39. doi:10.1145/2677955
- Mathad KS, Mangalwede SR (2015) Scheduling approaches and routing protocols in wireless mesh networks—a survey. *Int J Adv Res Comput Commun Eng* 4(8):307–310
- Saifullah A, Xu Y, Lu C, Chen Y (2015) Distributed channel allocation protocols for wireless sensor networks. *IEEE Trans Parallel Distrib Syst* 25(9):2264–2274. doi:10.1109/TPDS.2013.185
- Rhee I, Warriar A, Min J, Xu L (2009) DRAND: distributed randomized TDMA scheduling for wireless Ad Hoc networks. *IEEE Trans Mob Comput* 8(10):1384–1396. doi:10.1109/TMC.2009.59
- Zand P, Chatterjea S, Ketema J, Havinga P (2012) Distributed scheduling algorithm for real-time (D-SAR) industrial wireless sensor and actuator networks. Proc. of the 17th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA'12). doi:10.1109/ETFA.2012.6489719
- Li Y, Zhang H, Huang Z, Albert M (2014) Optimal link scheduling for delay-constrained periodic traffic over unreliable wireless links. Proc. of the 33th IEEE Conference on Computer Communication (INFOCOM'14). doi:10.1109/INFOCOM.2014.6848081
- Zhang S, Zhang G, Yan A, Xiang Z, Ma T (2013) A highly reliable link scheduling strategy for WirelessHART networks. Proc. of the 2013 I.E. International Conference on Advanced Technologies for Communication (ATC). doi:10.1109/ATC.2013.6698073
- Saifullah A, Xu Y, Lu C, Chen Y (2010) Real-time scheduling for WirelessHART networks. Proc. of the 31st IEEE Real-Time Systems Symposium (RTSS). doi:10.1109/RTSS.2010.41
- Dang K, Shen JC, Dong LD, Xia YX (2013) A graph route-based superframe scheduling scheme in WirelessHART mesh networks for high robustness. *Wirel Pers Commun* 71(4):2431–2444. doi:10.1007/s11277-012-0946-2
- Suriyachai P, Roedig U, Scott A (2009) Implementation of a MAC protocol for QoS support in wireless sensor networks. Proc IEEE Int Conf Pervasive Comput Commun. doi:10.1109/PERCOM.2009.4912839
- Broch D, Maltz A, Johnson DB, Hu YC, Jetcheva J (1998) A performance comparison of multi-hop wireless ad hoc network routing protocols. Proc. of the 4th ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (Mobicom98). doi:10.1145/288235.288256
- XDM2510H, 2.4 GHz IEEE 802.15.4 WirelessHART compliant radio module, RF Monolithics, Mar. 2011
- Tanghe E, Joseph W et al (2008) The industrial indoor channel: large-scale and temporal fading at 900, 2400, and 5200 MHz. *IEEE Trans Wirel Commun* 7(7):2740–2751. doi:10.1109/TWC.2008.070143





# Bibliografía

- [1] Global Industrial Wireless Sensor Networks (IWSN) Market is Set for a Rapid Growth and is Expected to Reach USD 1,204.54 Million by 2022, URL <https://www.zionmarketresearch.com/news/industrial-wireless-sensor-networks-market>
- [2] A. Flammini, P. Ferrari, D. Marioli, E. Sisinni and A. Taroni, "Wired and wireless sensor networks for industrial applications," *Microelectronics Journal*, vol. 40, no. 9, pp. 1322-1336, September 2009, doi: 10.1016/j.mejo.2008.08.012
- [3] J.R. Gisbert, C. Palau, M. Uriarte, G. Prieto, J.A. Palazón, M. Esteve, O. López, J. Correas, M.C. Lucas-Estañ, P. Giménez, A. Moyano, L. Collantes, J. Gozávez, B. Molina, O. Lazaro and A. González, "Integrated system for control and monitoring industrial wireless networks for labor risk prevention," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 39, pp. 233-252, March 2014, doi: 10.1016/j.jnca.2013.07.014
- [4] "Technical Report; Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); System Reference Document; Short Range Devices (SRD); Part 2: Technical characteristics for SRD equipment for wireless industrial applications using technologies different from Ultra-Wide Band (UWB)", ETSI TR 102 889-2 V1.1.1, August 2011.
- [5] Research project Koordinierte Industriekommunikation (Koi) supported by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF) of Germany, Duration: 01/2015–06/2017; <http://www.koi-projekt.de>
- [6] B. Holfeld, D. Wieruch, T. Wirth, L. Thiele, S. A. Ashraf, J. Huschke, I. Aktas and J. Ansari, "Wireless Communication for Factory Automation: an opportunity for LTE and 5G systems," *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 6, pp. 36-43, June 2016, doi: 10.1109/MCOM.2016.7497764

- [7] P. Zand, S. Chatterjea, K. Das, and P. Havinga, "Wireless industrial monitoring and control networks: The journey so far and the road ahead," *Journal of Sensor and Actuator Networks*, vol. 1, no. 2, pp. 123–152, August 2012, doi: 10.3390/jsan1020123
- [8] A. Willig, K. Matheus and A. Wolisz, "Wireless technology in industrial networks," *Special Issue on Industrial Communication Systems*, vol. 93, no. 6, pp. 1130-1151, June 2005, doi: 10.1109/JPROC.2005.849717
- [9] V. C. Gungor and G. P. Hancke, "Industrial wireless sensor networks: Challenges, design principles, and technical approaches," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 10, pp. 4258-4265, October 2009, doi: 10.1109/TIE.2009.2015754
- [10] IEC 62591 Ed. 1.0: Industrial communication networks -Wireless communication network and communication profiles-WirelessHART™, International Electrotechnical Commission, IEC, 2010.
- [11] Wireless Systems for Industrial Automation: Process Control and Related Applications, ISA-100.11a-2009 Standard, 2009.
- [12] S. Petersen and S. Carlsen, "WirelessHART Versus ISA100.11a: The Format War Hits the Factory Floor," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 5, no. 4, pp. 23-34, December 2011, doi: 10.1109/MIE.2011.943023
- [13] IEEE 802.15.4-2006. Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications.
- [14] IEEE Std. 802.15.4e-2012, "Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs), Amendment 1: MAC sublayer," 2012.
- [15] D. D. Guglielmo, G. Anastasi and A. Seghetti, "From IEEE 802.15.4 to IEEE 802.15.4e: a step towards the internet of things," *Advances onto the Internet of Things*, vol. 260, pp. 135–152, January 2014, doi:10.1007/978-3-319-03992-3\_10
- [16] H. A. Salam and B. M. Khan, "IWSN – standards, challenges and the future," *IEEE Potentials*, vol. 35, no. 2, pp. 9-16, March/April 2016, doi: 10.1109/MPOT.2015.2422931
- [17] S. Montero, "Impacto de la movilidad en el rendimiento del estándar de comunicaciones industriales WirelessHART," *M.S. thesis*, Universidad Miguel Hernández de Elche, Elche (España), 2012.
- [18] HART Field Communication Protocol Specification, Revision 7.0, HART Communication Foundation, Sept. 2007.

- [19] HART Communication Protocol Specification, HCF SPEC 13 Revision 7.1, HART Communication Foundation, Jun. 2008
- [20] IEC 62591 Ed. 2.0: Industrial networks - Wireless communication network and communication profiles - WirelessHART™, International Electrotechnical Commission, IEC, 2016.
- [21] Guidelines For 64-bit Global Identifier (EUI-64), <http://standards.ieee.org/develop/regauth/tut/eui64.pdf>
- [22] W. W. Peterson and D. T. Brown, "Cyclic codes for error detection," *Proceedings of the IRE*, vol. 49, no. 1, pp. 228–235, January 1961, doi: 10.1109/JRPROC.1961.287814
- [23] National Institute of Standards and Technology, "Advanced Encryption Standard (AES)," *Federal Information Processing Standards Publications – FIPS 197*, November 2001, doi: 10.6028/NIST.FIPS.197
- [24] B. Awerbuch and R. Gallager, "A new distributed algorithm to find breadth first search trees," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. IT-33, no. 3, pp. 315–322, May 1987, doi: 10.1109/TIT.1987.1057314
- [25] T. S. Rappaport, "Wireless Communications: Principles & Practices," Prentice Hall, 1996.
- [26] E. Tanghe, W. Joseph, L. Verloock, L. Martens, H. Capoen, K. V. Herwegen and W. Vantomme, "The industrial indoor channel: large-scale and temporal fading at 900, 2400, and 5200 MHz," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 7, no. 7, pp. 2740–2751, July 2008, doi: 10.1109/TWC.2008.070143
- [27] K. Dang, J. Z. Shen, L. D. Dong, and Y. X. Xia, "A Graph Route-Based Superframe Scheduling Scheme in WirelessHART Mesh Networks for High Robustness," *Wireless Personal Communications*, vol. 71, no. 4, pp. 2431–2444, 2013, doi: 10.1007/s11277-012-0946-2
- [28] A. Willig, "Recent and Emerging Topics in Wireless Industrial Communications: A Selection," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 4, pp. 102–124, May 2008, doi: 10.1109/TII.2008.923194
- [29] G. Sun, F. Wu, X. Gao, G. Chen and W. Wang, "Time-Efficient Protocols for Neighbor Discovery in Wireless Ad Hoc Networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 62, no. 6, pp. 2780–2791, July 2013, doi: 10.1109/TVT.2013.2246204

- [30] W. Sun, Z. Yang, X. Zhang and T. Liu, "Energy-Efficient Neighbor Discovery in Mobile Ad Hoc and Wireless Sensor Networks: A Survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 16, no. 3, pp. 1448-1459, Third Quarter 2014, doi: 10.1109/SURV.2013.012414.00164
- [31] A. A. Khan, M.H. Rehmani and Y. Saleem, "Neighbor discovery in traditional wireless networks and cognitive radio networks: Basics, taxonomy, challenges and future research directions," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 52, pp. 173-190, June 2015, doi: 10.1016/j.jnca.2015.03.003
- [32] S. Vasudevan, M. Adler, D. Goeckel and D. Towsley, "Efficient Algorithms for Neighbor Discovery in Wireless Networks," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 21, no. 1, pp. 69-83, February 2013, doi: 10.1109/TNET.2012.2189892
- [33] M. J. McGlynn and S. A. Borbash, "Birthday protocols for low energy deployment and flexible neighbor discovery in ad hoc wireless networks," *Proceedings of the 2nd ACM International Symposium on Mobile ad hoc Networking & Computing (MobiHoc)*, pp. 137-145, California (USA), 4-5 October 2001, doi: 10.1145/501431.501435
- [34] T. Meng, F. Wu and G. Chen, "Code-Based Neighbor Discovery Protocols in Mobile Wireless Networks," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 24, no. 2, pp. 806-819, April 2016, doi: 10.1109/TNET.2015.2388534
- [35] H. Kaaranen, A. Ahtiainen, L. Lairinen, S. Naghian and V. Niemi, "UMTS Networks: Architecture, Mobility and Services," *John Wiley & Sons*, 2001.
- [36] A. Kandhalu, K. Lakshmanan and R. Rajkumar, "U-connect: a low-latency energy-efficient asynchronous neighbor discovery protocol," *Proceedings of the 9th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN)*, pp. 350-361, Stockholm (Sweden), 12-16 April 2010, doi: 10.1145/1791212.1791253
- [37] B. Zhang, Y. Li, D. Jin, and Z. Han, "Network science approach for device discovery in mobile device-to-device communications," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 7, pp. 5665-5679, July 2016, doi: 10.1109/TVT.2015.2453234
- [38] V. Dyo and C. Mascolo, "Efficient Node Discovery in Mobile Wireless Sensor Networks," *Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS)*, pp. 478-485, Santorini Island (Greece), 11-14 June 2008, doi: 10.1007/978-3-540-69170-9\_33

- [39] L. Chen, K. Bian and M. Zheng, "Never Live Without Neighbors: From Single- to Multi-Channel Neighbor Discovery for Mobile Sensing Applications," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 24, no. 5, pp. 3148-3161, October 2016, doi: 10.1109/TNET.2015.2505170
- [40] M. Zhang, L. Zhang, P. Yang and Y. Yan, "McDisc: A Reliable Neighbor Discovery Protocol in Low Duty Cycle and Multi-channel Wireless Networks," *Proceedings of the 8th IEEE International Conference on Networking, Architecture, and Storage (NAS)*, pp. 1-9, Shaanxi (China), 17-19 July 2013, doi: 10.1109/NAS.2013.7
- [41] XDM2510H, 2.4 GHz IEEE 802.15.4 WirelessHART compliant radio module, RF Monolithics, March 2011.
- [42] 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, doi: 10.1109/SURV.2012.013012.00051
- [43] A. Sgora, D. J. Vergados and D. D. Vergados, "A Survey of TDMA Scheduling Schemes in Wireless Multihop Networks," *ACM Computing Surveys*, vol. 47, no. 3, art. 53, pp. 1-39, April 2015, doi: 10.1145/2677955
- [44] K. S. Mathad and S. R. Mangalwede, "Scheduling Approaches and Routing Protocols in Wireless Mesh Networks-A Survey," *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, vol. 4, no. 8, pp. 307-310, August 2015, doi: 10.17148/IJARCCCE.2015.4865
- [45] A. Saifullah, Y. Xu, C. Lu and Y. Chen, "Distributed Channel Allocation Protocols for Wireless Sensor Networks," *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 25, no. 9, pp. 2264-2274, September 2014, doi: 10.1109/TPDS.2013.185
- [46] I. Rhee, A. Warrior, J. Min and L. Xu, "DRAND: Distributed Randomized TDMA Scheduling for Wireless Ad Hoc Networks," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 8, no. 10, pp. 1384-1396, October 2009, doi: 10.1109/TMC.2009.59
- [47] P. Zand, S. Chatterjea, J. Ketema and P. Havinga, "Distributed Scheduling Algorithm for Real-time (D-SAR) Industrial Wireless Sensor and Actuator Networks," *Proceedings of the 17th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA)*, Krakow (Poland), 17-21 September 2012, doi: 10.1109/ETFA.2012.6489719

- [48] F. Dobsław, T. Zhang and M. Gidlund, "End-to-end reliability-aware scheduling for wireless sensor networks," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 12, no. 2, April 2016, doi: 10.1109/TII.2014.2382335
- [49] Y. Li, H. Zhang, Z. Huang and M. Albert, "Optimal link scheduling for delay-constrained periodic traffic over unreliable wireless links," *Proceedings of the 33th IEEE Conference on Computer Communication (INFOCOM'14)*, Toronto (Canada), 27 April - 2 May 2014, doi: 10.1109/INFOCOM.2014.6848081
- [50] S. Zhang, G. Zhang, A. Yan, Z. Xiang and T. Ma, "A highly reliable link scheduling strategy for WirelessHART networks," *Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Advanced Technologies for Communication (ATC)*, Ho Chi Minh (Vietnam), 16-18 October 2013, doi: 10.1109/ATC.2013.6698073
- [51] A. Saifullah, Y. Xu, X. Lu and Y. Chen, "Real-Time Scheduling for WirelessHART Networks," *Proceeding of the 31st IEEE Real-Time Systems Symposium (RTSS)*, California (USA), 30 November – 3 December 2010, doi: 10.1109/RTSS.2010.41
- [52] P. Suriyachai, U. Roedig and A. Scott, "Implementation of a MAC protocol for QoS support in wireless sensor networks," *Proceedings of the IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom 2009)*, Texas (USA), 9-13 March 2009, doi: 10.1109/PERCOM.2009.4912839
- [53] P. Suriyachai, U. Roedig and A. Scott, "A Survey of MAC Protocols for Mission-Critical Applications in Wireless Sensor Networks," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 14, no. 2, pp. 240-264, Second Quarter 2012, doi: 10.1109/SURV.2011.020211.00036
- [54] J. Broch, D. A. Maltz, D. B. Johnson, Y. C. Hu and J. Jetcheva, "A performance comparison of multi-hop wireless ad hoc network routing protocols," *Proceedings of the 4th ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (Mobicom98)*, Texas (USA), 25-30 October 1998, doi: 10.1145/288235.288256
- [55] M. Radi, B. Dezfouli, K. A. Bakar and M. Lee, "Multipath Routing in Wireless Sensor Networks: Survey and Research Challenges," *Sensors*, vol. 12, pp. 650–685, 2012, doi: 10.3390/s120100650
- [56] S. Kumar and S. Chauhan, "A Survey on Scheduling Algorithms for Wireless Sensor Networks," *International Journal of Computer Applications*, vol. 20, pp. 7–13, 2011, doi: 10.5120/2432-3271

- [57] M. Nobre, I. Silva and L. A. Guedes, "Routing and Scheduling Algorithms for WirelessHART Networks: A Survey," *Sensors*, vol. 15, pp. 9703-9740, 2015, doi: 10.3390/s150509703
- [58] S. Han, X. Zhu, A. Mok, D. Chen and M. Nixon, "Reliable and Real-Time Communication in Industrial Wireless Mesh Networks," *Proceedings of the 17th IEEE Symposium on Real-Time and Embedded Technology and Applications*, Chicago (USA), 11-14 April 2011, doi: 10.1109/RTAS.2011.9
- [59] Q. Zhang, F. Li, L. Ju, Z. Jia and Z. Zhang, "Reliable and Energy Efficient Routing Algorithm for WirelessHART," *Proceeding of the International Conference on Algorithms and Architectures for Parallel Processing (ICA3PP 2014): Algorithms and Architectures for Parallel Processing*, Dalian (China), 24-27 August 2014, doi: 10.1007/978-3-319-11197-1\_15
- [60] R. Silva, Z. Zinonos, J. S. Silva and V. Cassiliou, "Mobility in WSNs for critical applications," *Proceedings of the IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, Kerkyra (Greece), 28 June - 1 July 2011, doi: 10.1109/ISCC.2011.5983878
- [61] Z. Zinono and V. Vassilou, "S-GinMob: Soft-handoff solution for mobile users in industrial environments," *Proceedings of the Distributed Computing in Sensor Systems and Workshops (DCOSS)*, Barcelona (Spain), 27-29 June 2011, doi: 10.1109/DCOSS.2011.5982226
- [62] S. Girs, E. Uhlemann and M. Björkman, "On the benefits of using relaying in industrial networks with different wireless channel characteristics," *Third Nordic Workshop on Systems & Network Optimization for Wireless*, Trysil (Norway), April 2012.
- [63] S. Girs, E. Uhlemann and M. Björkman, "Increased Reliability or Reduced Delay in Wireless Industrial Networks Using Relaying and Luby Codes," *Proceedings of the 18th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Cagliari (Italy), 10-13 September 2013, doi: 10.1109/ETFA.2013.6648015