

TESIS DEFENDIDA POR  
**Erica Cecilia Ruiz Ibarra**  
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ

---

Dr. Luis Armando Villaseñor González  
*Director del Comité*

---

Dr. Jaime Sánchez García  
*Miembro del Comité*

---

Dr. José Rosario Gallado López  
*Miembro del Comité*

---

Dr. José Antonio García Macías  
*Miembro del Comité*

---

Dr. Javier Gómez Castellanos  
*Miembro del Comité*

---

Dr. Roberto Conté Galván  
*Coordinador del programa de posgrado  
en Electrónica y Telecomunicaciones*

---

Dr. David Hilario Covarrubias Rosales  
*Director de Estudios de Posgrado*

13 de Agosto de 2010.

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR  
DE ENSENADA**



---

**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS  
EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

---

**MECANISMO DE COORDINACIÓN PARA REDES INALÁMBRICAS DE  
SENSORES Y ACTORES**

TESIS  
que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de  
DOCTOR EN CIENCIAS

Presenta:  
ERICA CECILIA RUIZ IBARRA

Ensenada, Baja California, México, Agosto de 2010.

**RESUMEN** de la tesis de **Erica Cecilia Ruiz Ibarra**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de DOCTOR EN CIENCIAS en Electrónica y Telecomunicaciones con orientación en Telecomunicaciones. Ensenada, Baja California. Agosto 2010.

## **MECANISMO DE COORDINACIÓN PARA REDES INALÁMBRICAS DE SENSORES Y ACTORES**

Resumen aprobado por:

---

Dr. Luis A. Villaseñor González

Las redes inalámbricas de sensores y actores (WSAN, por sus siglas en inglés) se utilizan para monitorizar parámetros físicos mediante el despliegue de sensores en un área de interés. La información de los sensores se envía a los actores para que éstos puedan procesar los datos, tomar decisiones autónomas y desarrollar acciones oportunas en respuesta a las mediciones de los sensores. Para lograr un desempeño eficiente, en una WSAN se deben implementar estrategias de coordinación que permitan una colaboración eficiente entre sensores y actores, procurando realizar una asignación óptima de recursos y que sea posible ejecutar tareas con el menor retardo posible.

A la fecha, existen varios problemas relacionados con la coexistencia de sensores y actores, que no han sido completamente resueltos, o al menos abordados; por ejemplo, no existe una metodología apropiada para el diseño de mecanismos de coordinación. En este sentido, como parte de las contribuciones de este trabajo, se propone una taxonomía nueva para la clasificación de los mecanismos de coordinación empleados en escenarios WSAN, la cual puede ser utilizada para el diseño de este tipo de redes. Adicionalmente, se propone un mecanismo de coordinación a nivel Sensor-Actor, el cual permite establecer una comunicación efectiva y eficiente entre los diferentes nodos que componen la WSAN. Como parte del mecanismo de coordinación, se propone un mecanismo de agrupamiento, que incorpora una arquitectura de red jerárquica, donde los actores móviles son seleccionados como líderes de grupo dentro de la WSAN. La propuesta implementa un mecanismo para actualizar la posición geográfica de los actores con el propósito de balancear la carga en términos del número de sensores dentro de cada grupo (o cluster), de esta forma se pretende extender el tiempo de vida de la red.

El mecanismo de coordinación propuesto se implementa utilizando el simulador de redes de datos OPNET y la herramienta MATLAB. La propuesta consta de cinco etapas que son implementadas en la capa de red y que incluyen: descubrimiento

de topología, estimación de la posición de los actores, balance de cargas, asociación de sensores, y enrutamiento. Las etapas uno, cuatro y cinco se implementan en OPNET, mientras que las etapas dos y tres se implementan en MATLAB. En el modelo de simulación, los nodos sensores y actores hacen uso de una capa de enlace de datos, basada en el estándar IEEE 802.15.4, la cual se implementó como parte del modelo de nodo. Adicionalmente, se implementó la interoperabilidad con un protocolo de enrutamiento multi-rutas en la capa de red. A partir de los resultados de simulación obtenidos, se muestra que el mecanismo de coordinación propuesto contribuye a lograr un ahorro en el consumo de energía y reduce el tiempo transcurrido durante el reporte de un evento.

**Palabras Clave:** Wireless Sensor and Actor Networks, mecanismos de coordinación, eficiencia en energía, coordinación Sensor-Sensor y Sensor-Actor.

**ABSTRACT** of the thesis presented by **Erica Cecilia Ruiz Ibarra** as a partial requirement to obtain the DOCTOR OF SCIENCE degree in Electronic and Telecommunication. Ensenada, Baja California, México August 2010.

## **COORDINATION MECHANISM FOR WIRELESS SENSOR AND ACTOR NETWORKS**

Wireless sensor and actor networks (WSAN) are used to monitor physical parameters by deploying sensors in an area of interest. The information of the sensors is sent to the actors which process the data, make independent decisions and perform opportune actions in response to the measurements of the sensors. In order to achieve an efficient performance, a WSAN must implement coordination strategies to allow for efficient collaboration between sensors and actors, while making an optimal allocation of resources and executing tasks with the least possible delay.

Up to this date, there are several issues related to the coexistence of sensors and actors which have not been completely solved, or at least addressed; for example, there is no appropriate methodology for the design of coordination mechanisms. In this regard, as part of the contributions of this work, a new taxonomy is proposed for the classification of the coordination mechanisms employed in WSAN scenarios, which can be used for the design of this type of networks. Additionally, a coordination mechanism is proposed at the Sensor-Actor level to allow for effective and efficient communication between the different nodes in the WSAN. As part of the coordination mechanism, a clustering mechanism is proposed, which incorporates a hierarchical network architecture where the mobile actors are selected as cluster-heads in the WSAN. The proposal implements a mechanism to update the geographic position of the actors in order to balance the load in terms of the number of sensors within each group (or cluster), with the purpose of extending the network life time.

The proposed coordination mechanism is implemented using the OPNET data network simulator and the MATLAB tool. The proposal consists of five stages which are implemented at the network layer and include: topology discovery, estimation of the position of the actors, load balance, sensor association, and routing. Stages one, four and five are implemented in OPNET, while stages two and three are implemented in MATLAB. In the simulation model, the sensor nodes and actors make use of a data link layer based on the IEEE 802.15.4 standard, which is implemented as part of the node model. Additionally, the interoperability with a multipath routing protocol was implemented at the network layer. From the simulation results, it is observed that the proposed coordination mechanism contributes to reduce both the power consumption and the elapsed time during the report of an event.

**Keywords:** Wireless Sensor and Actor Networks, coordination, Energy efficiency, coordination Sensor-Sensor and Sensor-Actor relation.

## Dedicatorias

A Dios.

¡Roca en que me refugio, mi escudo, mi fuerza y salvación!  
Salmo (17).

A Adolfo.

Gracias amor, por caminar juntos en esta odisea, compartiendo lo insólito y lo cotidiano. Por tu amor e infinita paciencia.  
Te amo.

A mis padres Mirna Ibarra y José Ruiz

Por su amor y apoyo incondicional. Por los valores que me han inculcado con su ejemplo, que han hecho de mi lo que soy ahora.

A mi hermano Joel Ruiz Ibarra

Por la alegría y dinamismo que trajiste a mi vida. Por compartir nuestros retos apoyándonos siempre.

A mis primos, la Sra. María Luisa Ruiz y el Sr. Gregorio Espinoza  
Gracias por permitirme ser parte de su hermosa familia.

## Agradecimientos

Al Dr. Luis Villaseñor, mi director de tesis, por contribuir a mi formación como investigadora, a través de su asesoría y dedicación, por el trato amable y respetuoso con que siempre se condujo.

Al comité de tesis, Dr. José Rosario Gallardo López, Dr. Jaime Sánchez García, Dr. José Antonio García Macías y Dr. Javier Gómez Castellanos, por sus valiosos comentarios y aportaciones que enriquecieron este trabajo.

Al grupo CIMA, Dr. José Gallardo, Dr. Jaime Sánchez y Dr. Luis Villaseñor, por los momentos compartidos y el apoyo brindado en el aspecto personal. Por forjarme no sólo en el ámbito profesional. Ha sido enriquecedor trabajar con ustedes y contar con su valiosa amistad.

Al Dr. David Covarrubias por su apoyo desinteresado, por su amistad y confianza.

A los investigadores y personal de Cicese. Me llevo gratos momentos en mi corazón.

De manera especial a Joel y Adolfo, por su apoyo en el desarrollo de este trabajo, sin su ayuda esta parte de la odisea aún no llegaría a su fin. Juntos lo lograremos.

A la Familia Ibarra y la Familia Espinoza, por sus oraciones y la alegría con que inundan mi vida.

A Carmen Maya, una amiga muy querida. Gracias por compartir nuestras alegrías y angustias, por tu apoyo incondicional.

A las chicas Brenda, Vero, Mary Carmen por la hermosa amistad que iniciamos y que espero sigamos cultivando.

A mis compañeros Sarai, Silvia, Leonel, Jorge, Paúl, por su amistad y gratos momentos compartidos.

Al ITSON y PROMEP por el apoyo económico y las facilidades brindadas para mi formación profesional.

Al todos los compañeros del Dpto. de Ing. Eléctrica del ITSON por su solidaridad y apoyo.

A todas aquellas personas que formaron parte de esta aventura, y que contribuyeron con su amistad y apoyo desinteresado. Gracias!

# CONTENIDO

Página

Resumen español .....	i
Resumen inglés .....	iii
Dedicatorias .....	iv
Agradecimientos .....	v
Contenido .....	vi
Lista de Figuras .....	x
Lista de Tablas .....	xii
<b>Capítulo I Introducción .....</b>	<b>1</b>
I.1. Introducción.....	1
I.2. Planteamiento del problema.....	3
I.3. Justificación.....	4
I.4. Objetivo.....	6
I.5. Alcances y Limitaciones.....	6
I.6. Método.....	7
I.7. Materiales y Herramientas.....	10
I.8. Organización de la tesis.....	11
I.9. Contribuciones del trabajo de tesis.....	12
I.9.1. Productos Publicados.....	12
<b>Capítulo II Redes Inalámbricas de Sensores y Actores .....</b>	<b>15</b>
II.1. Introducción.....	15
II.2. Características de WSAN.....	17
II.2.1. Elementos de una WSAN.....	18
II.2.2. Tipos de arquitecturas.....	20
II.2.3. Niveles de coordinación en una arquitectura WSAN.....	22
II.3. Pila de protocolos para WSAN.....	25
II.4. Aspectos prácticos de WSANs relacionados con el manejo de energía.....	26
II.5. Conectividad y cobertura en WSAN.....	29
II.6. Resumen.....	30



## CONTENIDO (continuación)

	Página
<b>Capítulo III Taxonomía de Mecanismos de Coordinación.....</b>	<b>32</b>
III.1. Introducción.....	32
III.2. Elementos de la Taxonomía de Mecanismos de Coordinación para WSANs...33	33
III.2.1. Estructura WSAN.....	33
III.2.2. Procedimientos Colaborativos.....	34
III.2.3. Criterios de Desempeño.....	36
III.2.4. Requerimientos de la Aplicación.....	37
III.3. Análisis Comparativo.....	38
III.3.1. Estructura WSAN.....	39
III.3.2. Procedimientos colaborativos.....	41
III.3.3. Criterios de desempeño.....	48
III.3.4. Requerimientos de la aplicación.....	50
III.4. Resumen.....	51
 <b>Capítulo IV Mecanismo de Coordinación para WSAN.....</b>	 <b>53</b>
IV.1. Introducción.....	53
IV.2. Diseño del mecanismo de coordinación propuesto.....	54
IV.2.1. Arquitectura WSAN.....	54
IV.2.2. Procedimientos colaborativos.....	55
IV.2.3. Criterios de desempeño.....	56
IV.2.4. Requerimientos de la aplicación.....	56
IV.3. Etapas del Mecanismo de Coordinación Propuesto.....	57
IV.3.1. Descubrimiento de Topología.....	57
IV.3.2. Estimación de posición de los actores.....	59
IV.3.3. Balance de carga.....	60
IV.3.4. Asociación de sensores.....	63
IV.3.5. Descubrimiento de rutas al actor asociado.....	63
IV.4. Resumen.....	68

## CONTENIDO (continuación)

	Página
<b>Capítulo V Implementación del Mecanismo de Coordinación propuesto</b> .....	<b>69</b>
V.1. Introducción.....	69
V.2. Análisis de Tareas.....	70
V.3. Ambiente de simulación en OPNET.....	71
V.4. Estructura del modelo de simulación.....	72
V.5. Análisis del modelo de programación.....	75
V.5.1. Modelo de nodo.....	76
V.5.2. Formato de paquetes.....	79
V.5.3. Módulo de radio.....	83
V.5.4. Módulo de Batería.....	85
V.5.5. Módulo de capa MAC.....	87
V.5.6. Módulo de Asociación.....	89
V.5.7. Interfaz de comunicación entre OPNET y MATLAB.....	90
V.5.8. Módulo de Enrutamiento.....	91
V.5.9. Modelo de comunicación.....	92
V.6. Resumen.....	93
<b>Capítulo VI Resultados de Simulación.....</b>	<b>95</b>
VI.1. Introducción.....	95
VI.2. Escenarios de Simulación.....	95
VI.2.1. Parámetros de Simulación.....	98
VI.2.2. Justificación de Escenarios de Prueba.....	99
VI.3. Análisis de Resultados.....	104
VI.3.1. Métricas de desempeño durante la transmisión de datos.....	105
VI.3.1.1. Escenario 1: $D_{ATx} = 15n/A_{Tx}$ .....	105
VI.3.1.2. Escenario 2: $D_{ATx} = 25n/A_{Tx}$ .....	109
VI.3.1.3. Escenario 3: $D_{ATx} = 6.3 n/A_{Tx}$ .....	111
VI.3.2. Impacto del proceso de configuración en las métricas de desempeño.....	115
VI.3.3. Desempeño de las etapas de estimación de posición y balance de cargas... ..	117
VI.3.3.1. Topologías de red.....	118
VI.4. Resumen.....	122

## CONTENIDO (continuación)

	Página
<b>Capítulo VII Conclusiones</b> .....	124
VII.1. Discusión de Resultados.....	124
VII.2. Contribuciones.....	127
VII.3. Trabajo Futuro.....	128
Bibliografía .....	133

## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura</i>		<i>Página</i>
Figura 1.	Diagrama de flujo del procedimiento utilizado.....	8
Figura 2.	Arquitectura WSAN.....	19
Figura 3.	Diagrama a bloques de los componentes de Sensores y Actores. ....	20
Figura 4.	Arquitectura a) Automática b) Semi-automática.....	21
Figura 5.	Niveles de Coordinación en WSAN.....	23
Figura 6.	Pila de protocolos WSAN.....	26
Figura 7.	Taxonomía de Mecanismos de Coordinación para WSAN's. ....	34
Figura 8.	Etapas del Mecanismo de Coordinación propuesto.....	58
Figura 9.	Diagrama de Voronoi de la red .....	59
Figura 11.	Fases del protocolo de enrutamiento.....	64
Figura 12.	Formato del mensaje de descubrimiento de rutas (RPRI, RALT). ....	65
Figura 13.	Formato del mensaje de prueba (WPRB) y de respuesta (WRSP).....	66
Figura 14.	Ambiente de simulación OPNET.....	72
Figura 15.	Modelo de Nodo.....	73
Figura 16.	Configuración de los módulos Tx y Rx.....	77
Figura 17.	Formato de paquete MAC ( <i>wpan_mac_pkt_format</i> ). ....	80
Figura 18.	Formato de paquete ACK ( <i>wpan_ack_frame_pkt_format</i> ). ....	81
Figura 19.	Formatos de paquete utilizados en el módulo de Asociación. ....	82
Figura 20.	Modelo de Procesos del módulo Battery.....	85
Figura 21.	Parámetros de energía inicial del nodo.....	86
Figura 22.	Parámetros de configuración del módulo Battery. ....	87
Figura 23.	Modelo de procesos de capa MAC IEEE 802.15.4. ....	88
Figura 24.	Modelo de procesos del módulo de Asociación. ....	90
Figura 25.	Procedimiento para intercambio de datos entre OPNET y MATLAB. .	91
Figura 26.	Modelo de procesos del módulo Multipath_Routing. ....	92
Figura 27.	Tasa de entrega de paquetes para diferentes parámetros MAC. ....	101
Figura 28.	Retardo extremo-extremo para diferentes parámetros MAC. ....	102

## LISTA DE FIGURAS (continuación)

<i>Figura</i>	<i>Página</i>
Figura 29. Conectividad de los nodos en un área 25m <sup>2</sup> .....	104
Figura 30. Consumo de energía para $D_{ATx}=15n/A_{Tx}$ .....	106
Figura 31. Retraso en la entrega de paquetes de datos para $D_{ATx}=15n/A_{Tx}$ . ....	107
Figura 32. Caudal de entrega de paquetes de datos para $D_{ATx}= 15n/A_{Tx}$ . ....	108
Figura 33. Energía promedio consumida para $D_{ATx}= 25n/A_{Tx}$ . ....	109
Figura 34. Retraso de entrega de paquetes de datos para $D_{ATx}=25 n/A_{Tx}$ . ....	110
Figura 35. Caudal de entrega de paquetes de datos para $D_{ATx}=25 n/A_{Tx}$ .....	111
Figura 36. Energía promedio consumida para $D_{ATx}= 6.3 n/A_{Tx}$ y $r= 5$ m. ....	112
Figura 37. Retraso de entrega de paquetes de datos para $D_{ATx}= 6.3 n/A_{Tx}$ . ....	112
Figura 38. Caudal de entrega de paquetes de datos para $D_{ATx}= 6.3 n/A_{Tx}$ . ....	114
Figura 39. Energía consumida por señalización para $D_{ATx}=15$ y $25 n/A_{Tx}$ .....	116
Figura 40. Asociación inicial de sensores con $N_S=60$ , $N_A=3$ y $D_{ATx}=30n/A_{Tx}$ . ....	118
Figura 41. Asociación de sensores después de la etapa de estimación de posición de actores para escenario con $N_S=60$ , $N_A=3$ , $r=10$ m y $D_{ATx}=30n/A_{Tx}$ . ....	119
Figura 42. Árboles de distribución después de la etapa de balance de cargas para un escenario con $N_S= 60$ , $N_A= 3$ , $r=10$ m y $D_{ATx}= 30 n/A_{Tx}$ . ....	120
Figura 43. Porcentaje de escenarios balanceados para diferentes densidades ( $n/A_{Tx}$ ) y número de actores. ....	122

## LISTA DE TABLAS

Tabla	Página
Tabla I. Comparación de la Arquitectura WSAN.....	39
Tabla II. Procedimientos Colaborativos.....	43
Tabla III. Criterios de Desempeño.....	48
Tabla IV. Requerimientos de la Aplicación.....	50
Tabla V. Parámetros del consumo de potencia.....	87
Tabla VI. Escenarios de Simulación.....	96
Tabla VII. Parámetros de Simulación.....	98
Tabla VIII. Comparación de resultados en energía y retardo para los diferentes modelos con una $D_{ATX} = 15n/A_{TX}$ .....	108
Tabla IX. Energía consumida y retardo extremo-extremo para $D_{ATX}=15$ y $25n/A_{TX}$ .....	110
Tabla X. Resumen de resultados de energía y retardo para las densidades analizadas.....	113
Tabla XI. Resumen de parámetros para las etapas de estimación de posición y balance de cargas.....	121

# Capítulo I

---

## Introducción

---

### I.1. Introducción.

Recientemente las redes inalámbricas de sensores (WSN por sus siglas en inglés) han sido centro de atención en la comunidad científica, debido a los desafíos teóricos y prácticos que éstas imponen. Sin embargo, existen escenarios más complejos que requieren la apropiada ejecución de acciones específicas, como resultado de la información recolectada por los nodos sensores. Ante esta necesidad, surgen las redes inalámbricas de sensores y actores (WSAN: Wireless Sensor and Actor Networks) como una importante extensión de las WSN (Akyildiz *et ál.*, 2002), cuyas aplicaciones generalmente demandan menores tiempos de respuesta que las WSN y, en algunas aplicaciones, mayor ancho de banda.

Una WSAN, está compuesta de sensores y actores distribuidos en un área geográfica de interés. Los sensores son responsables de monitorizar el ambiente físico, mientras que los actores ejecutan una tarea acorde a los datos colectados y reportados por los sensores durante un evento (Vassis *et ál.*, 2006). Para lograr un correcto desempeño, en una WSAN se deben implementar estrategias eficientes de comunicación cooperativa, que permitan a los nodos colaborar en la óptima asignación de recursos y ejecutar tareas con el menor retardo posible. Tal colaboración se debe llevar a cabo intercambiando información y generando decisiones negociadas mientras se intenta extender el tiempo de vida de la red

(Ruiz Ibarra y Villaseñor González, 2009). Como resultado, las WSN, así como las WSAN son un campo fértil para el estudio y experimentación de nuevos modelos cooperativos. Esto representa un reto, especialmente en redes de tipo WSAN, donde sensores y actores deben coordinar sus esfuerzos de manera óptima.

El término cooperación es derivado del prefijo latino *co* (de la preposición *cum* que significa con y expresa unión o compañía) y del término latino *operari* (que significa trabajo); por lo tanto, cooperación implica trabajar juntos. A partir de sus raíces etimológicas, cooperación puede ser considerada como la acción tomada por dos o más agentes que trabajan juntos para lograr una meta común. Dentro del contexto de las WSAN, los mecanismos de coordinación promueven la cooperación de múltiples dispositivos para lograr un objetivo específico; en consecuencia, las redes WSANs son consideradas sistemas cooperativos debido a que sus elementos son capaces de sensar, inferir, compartir información y realizar tareas con el propósito de lograr una meta común. Por ejemplo, en aplicaciones de incendios forestales, los sensores cooperan monitorizando el ambiente físico y reportando información sobre temperatura y la humedad entre otros. Una vez que una circunstancia, como puede ser un incendio, activa el proceso de reporte, los sensores proceden a transmitir la información relacionada con el evento hacia los nodos actores; cada actor, entonces reacciona y coopera para, oportunamente, tomar las acciones apropiadas. Como parte de los procesos de cooperación, las tareas deben ser delegadas entre las entidades vecinas para lograr un comportamiento óptimo. Por ejemplo, cuando un nodo fuente no está dentro de la cobertura de radio de su nodo destino, la información puede ser retransmitida a través de nodos intermedios (enrutamiento multi-saltos). Por lo tanto, la tarea de transmisión de datos es delegada a los nodos vecinos, los cuales a su vez delegan la tarea a otros nodos, hasta que los datos pueden ser entregados al nodo destino. La cooperación entre estas entidades no sólo se relaciona con el intercambio de información, sino además puede incluir otros



servicios, tales como agregación (fusión de datos), sincronización, localización, control de potencia entre otros.

## **I.2. Planteamiento del problema.**

El funcionamiento de una WSN se puede ver como un ciclo entre la detección del evento (monitoreo), el reporte del mismo (comunicación), y la toma de decisiones (evaluación), para la ejecución de tareas. Una red de tipo WSN puede considerarse como un sistema de control distribuido, diseñado para responder eficaz y oportunamente a la información de los sensores. Por esta razón, en una WSN es imperativo establecer esquemas de coordinación y comunicación con el menor retardo posible, eficientes en energía y escalables; con la finalidad de garantizar la ejecución oportuna de acciones adecuadas, de extender el tiempo de vida de la red, y de que ésta sea capaz de operar eficazmente aún cuando el número de dispositivos se incremente.

Como parte del diseño de mecanismos de coordinación para redes WSN, es necesario, primero, establecer los requerimientos de la comunicación entre sensores y actores, y cómo ésta debe llevarse a cabo. Enseguida, el mecanismo de coordinación diseñado debe ser tal, que soporte servicios con el menor retardo posible acorde a los requerimientos de la aplicación; que asegure una comunicación eficiente entre sensores y actores, considerando el consumo de energía; que proporcione ordenamiento, sincronización y eliminación de la redundancia de acciones; y que opere de manera distribuida para el desarrollo de tareas de sensado y ejecución oportuna de acciones.

### **I.3. Justificación.**

Los elementos necesarios para conformar las WSN se encuentran ya disponibles comercialmente. Por lo que, ya se están implementando dichas redes en ámbitos tan diversos como la agricultura, el sector militar, la geofísica, etc. Una aplicación interesante se ha dado en los países escandinavos, donde al colocar sensores de movimiento sobre cerdos y otros animales de corral, se sabe, con base en el patrón de movilidad, cuando dichos animales están en época reproductiva.

En California y Nevada se han hecho estudios para determinar la propagación de incendios, medir la intensidad de los mismos y cuantificar los niveles de contaminación consecuentes. En el noroeste de Estados Unidos y sur de Canadá, se utilizan redes para sensor parámetros, como la temperatura y la humedad, que influyen en la calidad de la uva para vino. De hecho no se requiere ir tan lejos para buscar ejemplos, pues este tipo de aplicaciones de monitoreo de campos agrícolas también se está gestando ya en México, particularmente, en Baja California; en efecto, mediante una colaboración entre Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) y el Centro de Integración de la Innovación Tecnológica (CENI2T<sup>1</sup>), se desarrollaron el hardware, el software y las aplicaciones específicas para mejorar la calidad de los cultivos, minimizar la ocurrencia de plagas y optimizar el uso de recursos como pesticidas y, agua. Además, existen empresas, como Agroligix<sup>2</sup> y Ubilogix<sup>3</sup>, que ofrecen productos para el monitoreo ambiental, fundamentales en los cultivos de invernadero, así como soluciones para granjas acuícolas, entre otros, basados en tecnología de WSN.

---

<sup>1</sup> Centro para la Integración de la Innovación Tecnológica: <http://www.ceni2t.org>

<sup>2</sup> Agroligix website: <http://agroligix.com>

<sup>3</sup> Ubilogix website: <http://www.ubilogix.com>

Como parte de los proyectos de aplicación prácticos en WSN, se encuentran los proyectos CRUISE<sup>4</sup> (Creating Ubiquitous Intelligent Sensing Environments) fundado por la Comisión Europea de WSN, e-SENSE<sup>5</sup> y WiSeNts<sup>6</sup> (Marron, Minder / the Embedded WiSeNts Consortium, 2006) así como otros proyectos desarrollados en Norteamérica, Europa y Asia. Estos proyectos clasifican las principales áreas de aplicación acorde al tipo de información sensada o transmitida en la red. Algunas de estas áreas son el monitoreo ambiental, cuidado de la salud, logística y aplicaciones industriales, que tienen gran importancia para la comunidad científica y la sociedad en general.

Estas aplicaciones pueden monitorizar ambientes interiores o exteriores. La red de micro-sensores permite obtener mediciones localizadas e información detallada acerca de espacios naturales donde no es posible hacerlo a través de métodos conocidos. A menudo en estas aplicaciones, la red provee soluciones concernientes a seguridad y vigilancia; desastres naturales (como inundaciones y terremotos) que pueden ser percibidos a tiempo, instalando una red de sistemas embebidos cercana al lugar donde ocurre el fenómeno y, que debe responder a cambios en las variables ambientales tan pronto como sea posible (Verdone *et ál.*, 2008).

Al concluir esta investigación se pretende aportar un mecanismo de coordinación a nivel Sensor-Actor para redes de sensores y actores, capaz de establecer una comunicación eficiente entre los elementos de la red, que facilitará la toma de decisiones oportunas de los nodos actores, y a su vez, coadyuvará en el desarrollo de una diversidad de aplicaciones, además de servir como base para incursionar en proyectos más avanzados en el estudio de WSN.

---

<sup>4</sup> CRUISE website: <http://www.ist-cruise.eu>

<sup>5</sup> eSENSE IST website: <http://www.ist-esense.org>

<sup>6</sup> WiSeNts website: <http://www.embedded-wisents.org>

#### **I.4. Objetivo.**

El presente proyecto de tesis propone diseñar un mecanismo de coordinación a nivel Sensor-Actor, capaz de reportar oportunamente la información recolectada por los sensores durante la ocurrencia de un evento, utilizar de manera eficiente los recursos disponibles y satisfacer los límites de tiempo demandados por la aplicación, a fin de establecer una comunicación efectiva y eficiente entre los diferentes nodos de una red WSAN.

Con la finalidad de alcanzar el objetivo planteado se definen los siguientes objetivos específicos:

- Generar una taxonomía para la clasificación de mecanismos de coordinación en WSAN.
- Especificar la estructura general del mecanismo de coordinación a diseñar, acorde a la taxonomía propuesta.
- Diseñar e implementar en una herramienta de simulación el mecanismo de coordinación propuesto, con el propósito de evaluar su desempeño.

#### **I.5. Alcances y Limitaciones.**

Como parte de los alcances del proyecto, éste contempla el diseño de un mecanismo de coordinación y la evaluación del desempeño del mismo, a través de un modelo de simulación y la comparación de métricas de desempeño con otros modelos de referencia.

Sin embargo, el trabajo de tesis no considera la implementación física de una red WSAN prototipo, principalmente, por restricciones de tiempo; y en segundo término, por no contar con el equipo y material necesario para su implementación.

## **I.6. Método.**

A continuación se describe el método seguido durante el desarrollo de esta investigación. En él se explica el procedimiento utilizado (Figura 1), se describe de manera general cómo se hicieron cada una de estas actividades y qué elementos, equipos y programas se utilizaron.

### **Investigación del estado del arte.**

Primeramente se realizó una investigación del estado del arte en WSN y WSAN a través de publicaciones recientes en revistas arbitradas y bibliografía relacionada, se identificaron áreas de oportunidad en el campo de WSAN, se definió el problema a atacar, los objetivos y limitaciones del trabajo, los cuales se fueron redefiniendo conforme maduraba el proyecto y se obtenía la experiencia necesaria.

### **Propuesta de una Taxonomía de Mecanismos de Coordinación para WSAN.**

Se analizaron diversas propuestas de mecanismos de coordinación y se observó la falta de consenso, en la comunidad científica, en el desarrollo de éstos. Ante la falta de una metodología de diseño para este tipo de sistemas, se propuso una Taxonomía que permitiera clasificar y comparar los mecanismos de coordinación existentes, e identificara los aspectos importantes en el diseño de éstos. La Taxonomía propuesta fue inspirada en los trabajos de (Salkhman *et ál.*, 2006 y Sameer *et ál.*, 2003) y consta de cuatro secciones: Estructura de WSAN, Procedimientos Colaborativos, Criterios de Desempeño y Requerimientos de la

Aplicación. En el capítulo III se describe detalladamente dicha Taxonomía y el análisis comparativo de mecanismos de coordinación publicados en la literatura.

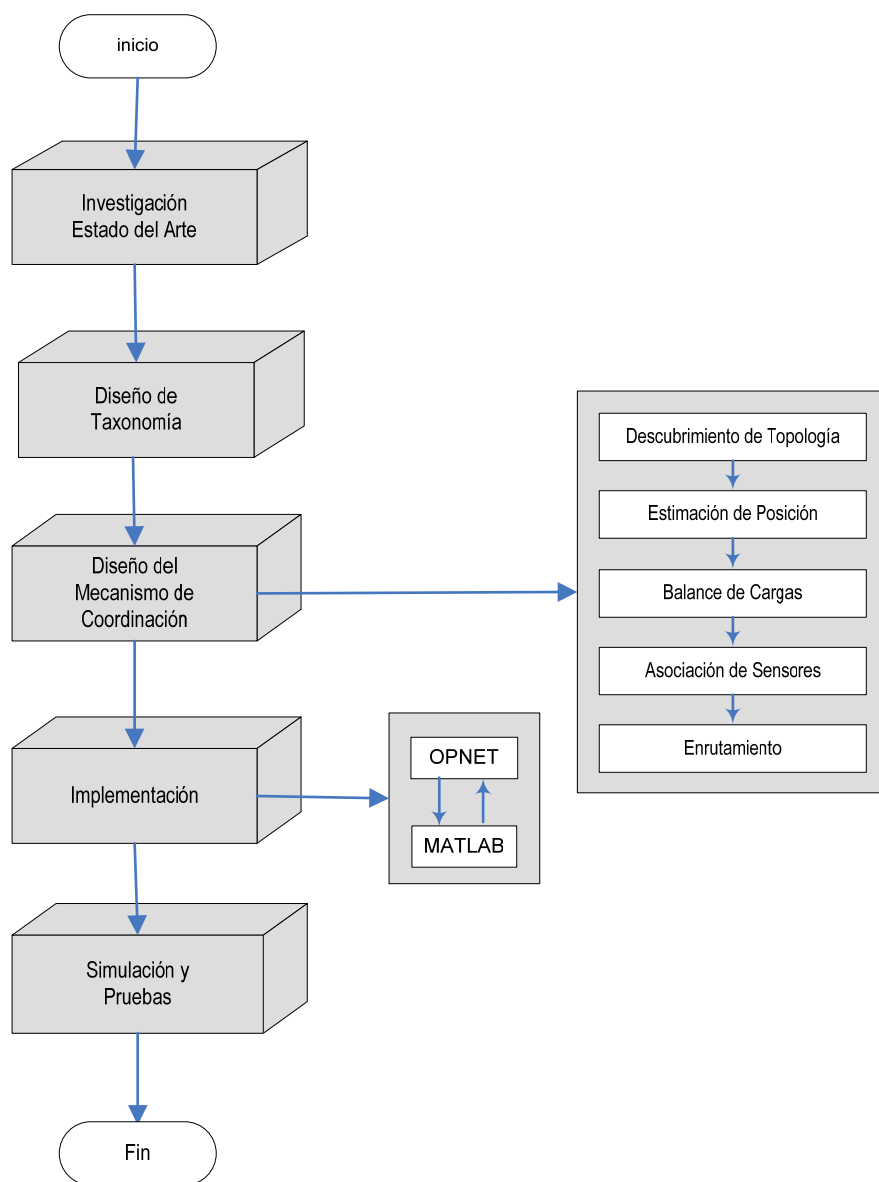


Figura 1. Diagrama de flujo del procedimiento utilizado.

### **Diseño de un Mecanismo de Coordinación.**

En este punto se establecieron las demandas y limitaciones del mecanismo de coordinación a diseñar, y se definió que éste debía ser eficiente en energía, distribuido y debía soportar servicios con el menor retardo posible, para garantizar la ejecución oportuna de acciones. Además se plantearon los requerimientos de la comunicación entre sensores y actores, y cómo ésta debía llevarse a cabo, basados en la *Taxonomía* propuesta.

El mecanismo propuesto consta de cinco etapas: *descubrimiento de topología*, *estimación de la posición de los actores*, *balance de cargas*, *asociación de sensores*, y *enrutamiento*. La primera etapa consiste en recabar la información de las coordenadas de posición de cada uno de los nodos en la red (sensores y actores) y centralizarla en el sumidero. En la segunda etapa se estima la posición óptima de los actores, utilizando el algoritmo K-medias (Lloyd, 1957). La etapa tres asocia a cada sensor con el actor adecuado para lograr un balance de carga en éstos, en término del número de sensores asociados. Por su parte, la etapa cuatro consiste en notificar a cada sensor el actor al que pertenece, como parte de los grupos formados durante la etapa tres. Por último, la etapa cinco realiza el descubrimiento de rutas de los nodos sensores hacia su actor asociado, utilizando un algoritmo de enrutamiento por multi-trayectorias (Gallardo López, *et ál.*, 2007), el cual se adaptó para operar con múltiples actores. La descripción detallada de cada una de estas etapas se presenta en el capítulo IV.

### **Implementación del modelo de simulación.**

A través del modelo de simulación es posible observar la evolución del sistema, sus características y propiedades. Con este propósito, en esta etapa se analizaron diferentes herramientas de simulación que permitieran modelar el sistema lo más apegado a la realidad, y se llevó a cabo la implementación del modelo en las herramientas seleccionadas.

Las cinco fases que componen al mecanismo de coordinación propuesto, son clasificadas en dos rubros principales: la parte de comunicación, encargada del intercambio de paquetes para la ejecución de tareas, y la parte de procesamiento matemático de la información. Debido a la naturaleza de dichas etapas se convino utilizar dos simuladores diferentes, acorde a cada una de las etapas. Específicamente, de las cinco etapas que conforman al mecanismo propuesto, las etapas de *descubrimiento de topología*, *asociación de sensores* y *enrutamiento* (etapas uno, cuatro y cinco) son implementadas en OPNET y las etapas de *estimación de posición* y *balance de cargas* (etapas dos y tres) son desarrolladas en MATLAB. En el capítulo V se describe a detalle la implementación de cada una de éstas.

### **Simulación y Pruebas.**

Simulación y Pruebas representa la última etapa del trabajo, en ésta se realizan experimentos bajo diferentes escenarios y se interpretan los resultados que arrojan las simulaciones, en base a los cuales se emite una conclusión.

Como parte de la validación del modelo se compararon los resultados obtenidos en escenarios que utilizan la posición del despliegue original de los actores, contra escenarios en los cuales se ejecutan los algoritmos de estimación de posición y balance de cargas propuestos. Algunos de los criterios de desempeño utilizados son: consumo de energía, retardo extremo-extremo y tasa de entrega de paquetes. Los parámetros de simulación y los resultados obtenidos en los diferentes escenarios se reportan en el capítulo VI.

## **I.7. Materiales y Herramientas.**

En esta sección se describe la infraestructura que permitió la implementación y evaluación de los algoritmos que componen el mecanismo de coordinación



propuesto, a través de modelos de simulación. La mayor parte de la infraestructura fue proporcionada por el Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada (CICESE):

- Computadora portátil HP, procesador AMD Turion 64 a 1.61 GHz, 1 GB de RAM y 120 GB de disco duro.
- Conexión a Internet.
- Biblioteca CCMC-UNAM.
- Biblioteca CICESE.
- Simulador de redes OPNET V14.0.
- Software matemático MATLAB 7.0

Además de análisis matemático y programación en lenguaje C++, lo que permitió obtener algunos resultados analíticos necesarios para este trabajo.

## **I.8. Organización de la tesis.**

El trabajo de tesis está organizado de la siguiente manera. El primer capítulo presenta una breve introducción acerca de las redes WSN, así como una descripción del problema a abordar, los objetivos del proyecto y delimitaciones del mismo. El segundo capítulo describe los principios y retos de las redes WSN. Por su parte, la Taxonomía de Mecanismos de Coordinación propuesta para escenarios WSN, es mostrada en el tercer capítulo. En este mismo apartado se incluye el análisis comparativo de los mecanismos de coordinación más representativos a la fecha, tomando como base la taxonomía propuesta. El cuarto capítulo presenta el mecanismo de coordinación propuesto, en el que se describen las cinco fases principales que lo componen. En el quinto capítulo se describe y analiza el modelo de simulación. Por su parte, en el sexto capítulo se muestran los resultados más importantes de la evaluación del desempeño del mecanismo

propuesto. Las conclusiones y el trabajo futuro son puntualizados en el séptimo capítulo. Finalmente, se enlistan las fuentes bibliográficas utilizadas, las cuales le dan validez y sustentan la actualidad del tema de investigación.

## **I.9. Contribuciones del trabajo de tesis.**

Dentro de las contribuciones más importantes de este trabajo se encuentran la creación de una Taxonomía para WSNs y el diseño de un Mecanismo de Coordinación para redes de tipo WSN, que se enfoca en la autoconfiguración de la red una vez desplegada. El mecanismo de coordinación contempla la estimación de posiciones óptimas de los actores, los cuales forman grupos con los sensores asociados, manteniendo el mejor balance de cargas posible, en cuanto al número de nodos asociados a cada actor. Estos algoritmos, en conjunto con los protocolos de comunicación utilizados, permiten reducir el tiempo transcurrido durante el reporte del evento y eficientar el consumo de energía de los nodos, logrando con ello extender el tiempo de vida de la red.

Como resultado de este trabajo se publicaron dos artículos en congresos internacionales, un capítulo de libro y dos artículos en revista. A continuación se presentan los productos mencionados, señalando la información principal de las publicaciones y enfatizando la aportación de cada producto.

### **I.9.1. Productos Publicados.**

#### **Congreso CERMA'07.**

- Nombre de la publicación: *Design Issues and Considerations for Coordination Mechanisms in Wireless Sensor and Actor Networks.*
- Nombre del congreso: *Electronics, Robotics and Automotive Mechanic Conference (CERMA).*

- Lugar y Fecha: Julio 2007. Cuernavaca, Morelos.
- Aportación: Motivados por el interés en el desarrollo de mecanismos de coordinación, se plantea una metodología para el diseño de mecanismos de coordinación. Específicamente, se presentan las consideraciones básicas para el diseño de mecanismos de coordinación, utilizados en WSANs.

### **Congreso WSAN'08.**

- Nombre de la publicación: *Cooperation Mechanism Taxonomy for Wireless Sensor and Actor Networks*.
- Nombre del congreso: *International Conference on Wireless Sensor and Actor Network (WSAN'08)*.
- Lugar y Fecha: Julio 2008. Ottawa Canadá.
- Aportación: La principal contribución de este trabajo es la propuesta de una taxonomía de mecanismos de coordinación para WSANs. Esta taxonomía provee una estructura para la clasificación de mecanismos de coordinación diseñados para ambientes WSAN. Además, basados en dicha taxonomía, se presenta un análisis comparativo de los mecanismos de coordinación más representativos, publicados a la fecha en el área de WSANs.
- Este artículo fue nominado como mejor propuesta.

### **Capítulo de Libro.**

- Nombre del capítulo: *Cooperation in Wireless Sensor and Actor Networks*.
- Título del libro: *Cooperative Wireless Communications*.
- Editorial: *Auerbach Publications, Taylor&Francis Group*
- Aportación: Este trabajo presenta una estructura para el estudio y análisis de procesos cooperativos y propone una taxonomía para la clasificación de mecanismos de coordinación diseñados para WSAN. Además, se resumen las propuestas más representativas de mecanismos de coordinación publicadas a la fecha, seguido por una clasificación y análisis comparativo

de dichas propuestas, utilizando la taxonomía sugerida. Finalmente, se establecen algunos nichos de oportunidad dentro del área de servicios cooperativos, con la finalidad de proveer una base para futuras investigaciones en el área de WSAAN.

#### **Artículo en revista.**

- Nombre de la publicación: *Cooperation Mechanism Taxonomy for Wireless Sensor and Actor Networks*.
- Nombre de la revista: *Ad Hoc & Sensor Wireless Networks Journal*.  
Publicación arbitrada reconocida por [Science Citation Index](#)
- Editorial: Old City Publishing, Ltd., London, UK.
- Fecha de aceptación: Julio 2008.
- Fecha de publicación: 2009.
- Aportación: Es una versión extendida del artículo publicado en el congreso WSAAN'08.

#### **Artículo en revista.**

- Nombre de la publicación: *A Load-balance Clustering Mechanism based on Location-control for Wireless Sensor and Actor Networks (WSAN)*.
- Nombre de la revista: *IEICE Transactions on Communications Letter*.  
Publicación arbitrada reconocida por [Science Citation Index](#)
- Fecha de aceptación: Agosto 6 de 2010.
- Aportación: En este trabajo se presenta un mecanismo de agrupamiento que organiza a los sensores para formar grupos, donde el líder del grupo es seleccionado del conjunto de actores móviles en la red WSAAN. La propuesta considera la movilidad de los actores e implementa un mecanismo para dinámicamente cambiar la posición geográfica de los actores, mientras intenta reducir la carga en términos del número de sensores dentro de cada grupo, todo esto con el propósito de extender el tiempo de vida de la red.

## Capítulo II

---

### Redes Inalámbricas de Sensores y Actores

---

#### II.1. Introducción.

Una red inalámbrica de sensores (WSN- Wireless Sensor Network) en su forma más simple puede ser definida como una red compuesta por dispositivos de tamaño reducido y baja complejidad, llamados nodos, que pueden sensar el ambiente y transmitir la información recolectada del campo monitorizado a través de enlaces inalámbricos (Chong y Kumar, 2003; Akyildiz, *et ál.*, 2002; Culler *et ál.*, 2004); los datos son retransmitidos, posiblemente mediante múltiples saltos a un nodo central o sumidero (sink), que puede utilizarse localmente o estar conectado a otras redes (Internet) a través de gateways. Los nodos pueden ser fijos o móviles y éstos pueden estar conscientes de su localización o no; de igual forma los nodos pueden ser homogéneos o no (Verdone *et ál.*, 2008).

En una red WSN generalmente existe un solo sumidero, sin embargo, este tipo de escenarios carece de escalabilidad, debido a que un aumento en el número de nodos, conlleva a un aumento en la cantidad de datos recolectados por el sumidero, y una vez alcanzada la capacidad de éste, el tamaño de la red ya no se puede incrementar. Además, por razones relacionadas con el control de acceso al medio (MAC) y con aspectos de enrutamiento, el desempeño de la red no se puede considerar independiente de su tamaño (Verdone *et ál.*, 2008).

Un escenario más general puede incluir múltiples sumideros. Al incrementar el número de nodos se disminuye la probabilidad de grupos de nodos aislados que no pueden entregar sus datos al sumidero. En principio, una red WSN con múltiples sumideros puede ser escalable, (es decir, se puede obtener el mismo desempeño aún si se incrementa el número de nodos) contrario a las redes con un solo sumidero. Sin embargo, una red con múltiples sumideros no representa una extensión trivial del caso de un solo sumidero, debido a que en el primer escenario, se pueden presentar dos casos: el primero donde todos los sumideros son conectados a través de redes separadas (cableadas o inalámbricas) y el segundo caso, en el que los sumideros están desconectados. En el primer caso, un nodo necesita retransmitir los datos recolectados a uno de los sumideros, lo que significa, desde el punto de vista de protocolos, que debe seleccionarse uno de los múltiples sumideros, y esta selección debe estar basada en algún criterio (mínimo retardo, máximo caudal eficaz, mínimo número de saltos etc). La presencia de múltiples sumideros asegura un mejor desempeño, con respecto a redes con un solo sumidero, sin embargo, los protocolos de comunicación requieren ser más complejos. En el segundo caso, cuando el sumidero no está conectado, la presencia de múltiples sumideros tiende a segmentar el campo monitorizado en áreas más pequeñas, sin necesidad de cambios significativos en los protocolos de comunicación. Claramente, el caso más general e interesante es el primero, con los sumideros conectados a través de cualquier tipo de red malla, o a través de enlaces directos con un Gateway común (Verdone *et ál.*, 2008).

Además de los escenarios descritos (un solo sumidero y múltiples sumideros), existen escenarios más complejos que requieren la apropiada ejecución de acciones específicas, como resultado de la información recolectada por los nodos sensores, a través de la incursión de nodos actores, capaces de manipular el ambiente, más que observarlo; ante esta necesidad, surgen las WSAN. Desde el punto de vista de protocolos de comunicación, la inclusión de actores no

representa una simple extensión de una WSN, ya que la complejidad de los protocolos es mucho mayor para redes WSN.

Las redes de tipo WSN representan un nuevo paradigma basado en el esfuerzo colaborativo de un gran número de sensores desplegados cerca o dentro del fenómeno a ser observado, que permiten proveer diversos servicios para numerosas aplicaciones. La implementación de este tipo de redes requiere de más investigación, especialmente en el consumo eficiente de energía para protocolos de comunicación escalables, debido a los requerimientos de las aplicaciones y a las limitantes de la misma red (Coates, 2005).

## **II.2. Características de WSN.**

Acorde con algunas definiciones generales, las redes inalámbricas Ad-hoc son formadas dinámicamente por un sistema autónomo de nodos conectados por enlaces inalámbricos, sin utilizar una infraestructura existente o administración centralizada. Aparentemente, esta definición puede incluir a las redes de tipo WSN, sin embargo, esto no es correcto.

Las redes Ad-hoc se caracterizan por ser altamente dinámicas; los nodos son terminales inteligentes (laptops, etc); aplicaciones típicas incluyen transmisión de datos, voz y multimedia en tiempo real o tiempo no real; cada nodo puede ser una fuente o un destino de información; cada nodo puede operar como un enrutador hacia otros nodos; la energía no es un aspecto importante, pero sí lo es la capacidad de los dispositivos (Gupta y Kummar, 2000). En cambio, en una WSN los nodos sensores son dispositivos sencillos de baja complejidad; las aplicaciones típicas requieren el envío periódico de unos cuantos bytes o la solicitud de información acorde a un evento externo; cada nodo puede ser la fuente o el destino de la información pero no ambos; algunos nodos no pueden

jugar el rol de enrutadores; la eficiencia en energía es un aspecto muy importante, mientras que la capacidad no lo es para la mayoría de las aplicaciones. Por lo tanto, las WSN no son un caso especial de las redes Ad-hoc. Se debe tener mucho cuidado al querer utilizar protocolos y algoritmos que son adecuados para redes Ad-hoc en el contexto de las WSN (Verdone *et ál.*, 2008).

### **II.2.1.Elementos de una WSN.**

Una red de tipo WSN está compuesta por una gran cantidad de sensores y unos cuantos actores conectados por medios inalámbricos; estos dispositivos cooperan entre sí para proveer sensado distribuido y ejecutar tareas específicas. Sensores y actores son esparcidos en el campo, mientras un nodo sumidero puede utilizarse para monitorizar la red y comunicarse con un administrador de tareas, como se ilustra en la Figura 2. En una WSN los sensores actúan como elementos pasivos, recolectando información del mundo físico, mientras que los actores se comportan como elementos activos que toman decisiones independientes y son capaces de ejecutar acciones apropiadas en el ambiente, que permiten a los usuarios efectivamente sensar y actuar desde la distancia (Akyildiz y Kasimoglu, 2004).

Los sensores son dispositivos de bajo costo, con capacidades de sensado, cómputo y comunicación limitados. Por su parte los actores son nodos equipados con mejores capacidades de procesamiento, transmisores más potentes y con mayor tiempo de vida en la batería. Sin embargo, el número de nodos sensores desplegados en un área puede ser de cientos a miles, mientras que en los actores este número disminuye considerablemente, debido a que poseen mayores capacidades y pueden actuar en áreas más grandes.

La densidad de los nodos es un parámetro muy relevante dentro de una WSN, ya que ésta define el nivel de cobertura del espacio monitorizado (es decir, el porcentaje de nodos necesarios tal que si ocurre un evento, éste sea detectado



por al menos un nodo). Por su parte, la densidad de actores juega un rol importante en la definición del desempeño de la red en términos de la capacidad de respuesta para realizar acciones en caso de que se detecte algún evento (Verdone *et ál.*, 2008).

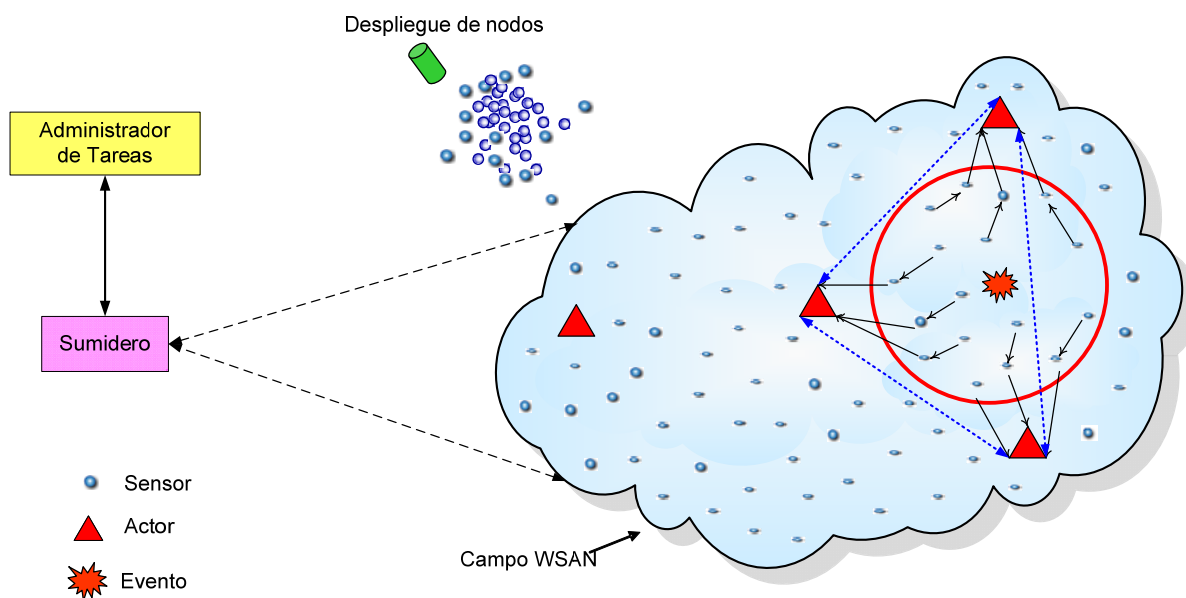


Figura 2. Arquitectura WSN.

La Figura 3 muestra un diagrama a bloques de los componentes de los nodos sensor y actor. Los nodos sensores son equipados con unidad de potencia, subsistema de comunicaciones, recursos para almacenamiento y procesamiento, convertidor analógico digital y la unidad de sensado. La unidad de sensado observa el fenómeno, los datos analógicos coleccionados son convertidos en datos digitales por el ADC y entonces éstos son analizados por el procesador y transmitidos hacia el actor. Por su parte en el actor la unidad de decisión (controlador) funciona como una entidad que toma las lecturas de los sensores como entradas y genera mandos de acción como salidas. Estos mandos de acción

son convertidos a señales analógicas por el DAC y transformadas en acciones mediante la unidad de actuación (Akyildiz y Kasimoglu, 2004).

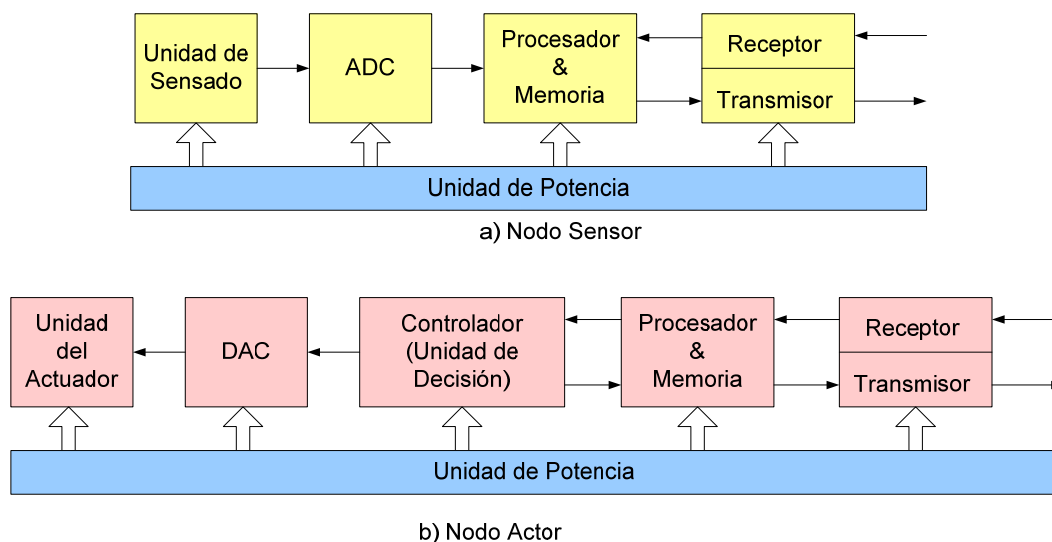


Figura 3. Diagrama a bloques de los componentes de Sensores y Actores.

## II.2.2. Tipos de arquitecturas.

Una red de tipo WSN puede considerarse como un sistema distribuido capaz de adaptarse y reaccionar a las condiciones ambientales, las cuales son reportadas por el esfuerzo colaborativo de todos los sensores y actores. Acorde a la forma en que los datos son colectados por los sensores y reportados a los actores, se identifican dos tipos de arquitecturas definidas como Automática y Semiautomática, ilustradas en la Figura 4 (Akyildiz y Kasimoglu, 2004).

En la *arquitectura automática*, los datos son colectados por los sensores y transmitidos directamente a los actores, los cuales se coordinan de manera eficiente para ejecutar tareas específicas sin la colaboración del sumidero. Como resultado, la arquitectura automática es recomendada para aplicaciones sensitivas

al tiempo que demandan una rápida respuesta del actor. Otra característica de esta arquitectura es el consumo eficiente de energía en la red, debido a que los sensores remotos (sensores localizados lejos del evento) no son involucrados en la retransmisión de datos hacia el actor, lo cual provoca un incremento en el tiempo de vida de la red. Sin embargo, como resultado de la comunicación directa entre sensores y actores, la arquitectura automática requiere la implementación de un mecanismo de coordinación eficiente para soportar la colaboración entre estos dispositivos (Akyildiz y Kasimoglu, 2004).

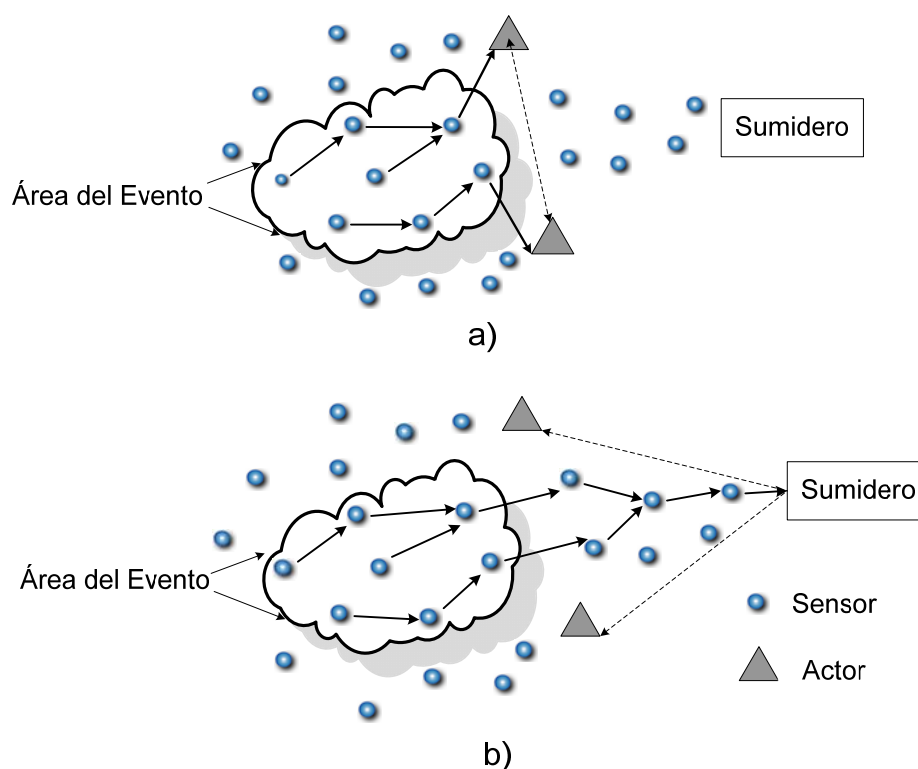


Figura 4. Arquitectura a) Automática b) Semi-automática.

En la *arquitectura semi-automática* los datos sensados son transmitidos a un controlador central (sumidero) el cual procesa los datos colectados y determina

qué actores deben participar en la ejecución de una tarea específica, esto es acompañado por la transmisión de un conjunto de mandos a los actores correspondientes. Este tipo de arquitectura es similar a la arquitectura empleada en redes WSN, por lo tanto es posible utilizar protocolos de comunicación desarrollados para WSN (Akyildiz y Kasimoglu, 2004). Una de las principales desventajas de esta arquitectura es el procesamiento centralizado de la información en el sumidero, lo cual puede incrementar el retardo durante la ejecución de una tarea desarrollada por los actores. Por lo tanto, la arquitectura semi-automática no es recomendada para aplicaciones sensitivas al tiempo.

### **II.2.3. Niveles de coordinación en una arquitectura WSAN.**

El proceso de comunicación en WSN principalmente se lleva a cabo entre el sumidero y los nodos sensores. Por el contrario, en WSAN este proceso, puede realizarse entre nodos sensores y actores. Por lo tanto, una arquitectura para redes de tipo WSAN requiere la implementación de diferentes niveles de coordinación, que involucran una serie de decisiones consensadas por múltiples dispositivos para realizar una acción común. Dependiendo del tipo de dispositivos que participan en el consenso, en las WSAN se identifican tres niveles de coordinación, mostrados en la Figura 5, los cuales tienen las siguientes funciones:

- *Sensor-Sensor*. La coordinación sensor-sensor es empleada para recabar información del mundo físico de una manera efectiva y eficiente. La coordinación a este nivel involucra la adaptación de técnicas de agrupamiento ("*clustering*") y una apropiada calendarización de períodos activos de los nodos, con la finalidad de minimizar el consumo de energía de los sensores y maximizar el tiempo de vida de la red. Para ello los nodos deberán colaborar entre sí para decidir cual de ellos será el líder de grupo ("*cluster-head*") y quiénes deberán permanecer activos durante cierto período.

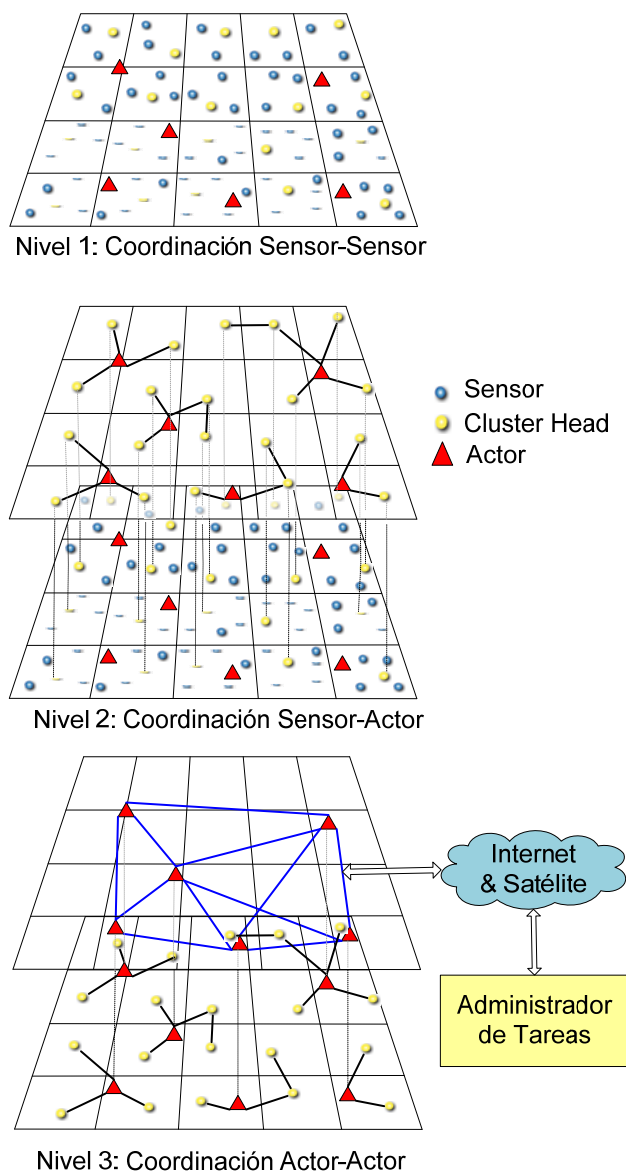


Figura 5. Niveles de Coordinación en WSN.

- *Sensor-Actor*. Esta coordinación es utilizada para reportar nuevos eventos y transmitir las características del evento desde los sensores a los actores (Hu, et ál., 2005). Además esta coordinación puede también utilizarse en el enlace de bajada (de los actores hacia los sensores) para informar a los sensores que procedan con tareas específicas de sensado.

Para minimizar la latencia entre el sensado y la ejecución de acciones, uno de los objetivos principales de este nivel de coordinación es transmitir las características del evento del líder de grupo (“*cluster-head*”) al actor apropiado en el menor tiempo posible. Para reducir la probabilidad de que la vida de los sensores expire debido a la excesiva carga de retransmisión y mantenimiento de la conectividad en la WSN, el siguiente objetivo de este nivel de coordinación es lograr que los actores desarrollen las tareas de mayor consumo de energía tales como: el cálculo de rutas, agregación de datos, y comunicaciones inalámbricas a largas distancias entre otras, explotando la superioridad de los actores en cuanto a capacidades de procesamiento, mayor potencia de transmisión y el tiempo de vida de su batería.

- *Actor-Actor*. Esta coordinación es requerida para generar la forma más apropiada para ejecutar una tarea, mientras los actores deben responder dentro de cierta área. Acorde a las características del evento, uno o más actores serán activados para desarrollar una o más tareas. El objetivo principal de este nivel de coordinación es maximizar el desempeño global de las tareas actualizando óptimamente las políticas de cooperación y asignación de tareas.

El objetivo de estos mecanismos es coordinar las acciones entre sensores y actores, mientras se utilizan de manera óptima los recursos y al mismo tiempo se ejecutan las tareas necesarias dentro de los límites de tiempo requeridos por la aplicación.

En redes de tipo WSN, múltiples actores pueden recibir la información de los sensores. Este caso se denota como Actores Múltiples (MA) donde cada sensor puede decidir independientemente a qué actor enviar sus lecturas. Por su parte cuando un solo actor recibe las características del evento sensado se denota como Actor Único (SA) (Akyildiz y Kasimoglu, 2004). Respecto al proceso de asignación de tareas, esto puede requerir un solo actor o la cooperación de

múltiples actores (Akyildiz y Kasimoglu, 2004). Durante el proceso de comunicación, existen dos posibles escenarios; uno involucra transmisiones a un salto, mientras el otro incluye transmisiones multi-salto. Las transmisiones a un salto son usualmente ineficientes en escenarios WSN, dado la gran distancia entre sensores y el sumidero, sin embargo, en WSAN esto puede no ser el caso, ya que los actores pueden estar localizados cerca de los sensores en el campo.

### **II.3. Pila de protocolos para WSAN.**

No existe una pila de protocolos estándar para WSN y WSAN. Se sugiere que dicha pila de protocolos consista de tres planos, como el mostrado en la Figura 6: el plano de comunicación, de coordinación y el de administración (Akyildiz y Kasimoglu, 2004). El plano de comunicación habilita el intercambio de información entre los nodos de la red. Los datos recibidos por un nodo en el plano de comunicación son remitidos al plano de coordinación, el cual decide cómo actúan los nodos. Sin embargo, el plano de coordinación permite a los nodos ser modelados como una entidad social, en términos de la coordinación y las técnicas de negociación que éste posea. El plano de administración es responsable de monitorizar y controlar un nodo sensor/actor para que éste opere apropiadamente. Este plano también provee la información necesaria por la capa de coordinación para la toma de decisiones.

En diversos trabajos de investigación, se recomienda un modelo de inter-capas (*cross layer*), (Akyildiz y Kasimoglu, 2004 y Dinh, *et ál.*, 2005) donde las capas sean integradas unas con otras. Mediante la propuesta de inter-capas, cada protocolo comparte sus datos con otros protocolos, evitando con ello ineficiencias. Para proveer una estructura de paquete unificado que incorpore las funcionalidades de cada protocolo, las capas de enrutamiento, MAC y física deben ser investigadas juntas. La idea básica de inter-capas es que cada capa de la pila

de protocolos no sólo responda a las variaciones locales, sino también a la información de otras capas.

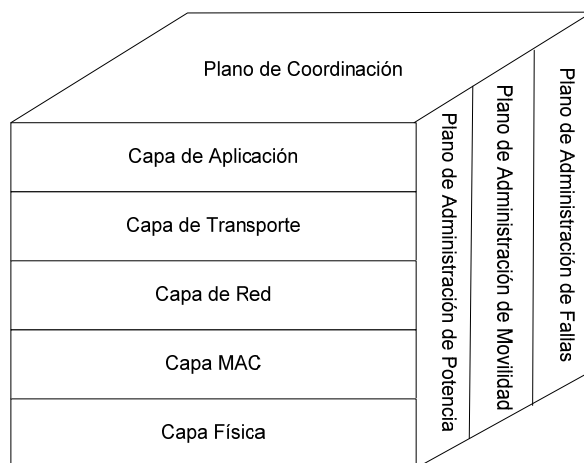


Figura 6. Pila de protocolos WSN.

#### **II.4. Aspectos prácticos de WSNs relacionados con el manejo de energía.**

El uso eficiente de energía es un aspecto clave en la mayoría de las aplicaciones WSN. El tiempo de vida de la red debe extenderse lo más posible. Claramente esto depende de qué tan largos sean los períodos desde que se inicia con el despliegue de la red hasta el final, cuando la batería de los nodos sensores no es capaz de proveer la energía necesaria para la comunicación, sensado o procesamiento.

Suponiendo que los sumideros, gateways y actores están conectados a una fuente de energía recargable como por ejemplo una celda solar, entonces la eficiencia de energía debe aplicarse sólo para los nodos sensores.



Como se mostró en la Figura 3, un nodo básicamente está compuesto de una batería, un microprocesador, una memoria, los sensores y el transceptor. Normalmente, el transceptor drena más corriente de la batería cuando se encuentra en modo de transmisión, que el microprocesador en estado activo, o que los sensores y la memoria. La tasa entre la energía necesaria para transmitir un bit y la necesaria para procesar un bit de información es usualmente mucho mayor que uno (una relación de 1 a 100 o de 1 a 1000 en la mayoría de las plataformas comerciales). Por esta razón, los protocolos de comunicación necesitan ser diseñados acorde a los paradigmas de eficiencia en energía. El transceptor tiene un alto consumo de energía, tanto en el estado de transmisión como en el de recepción. Es por ello, que el transceptor debe permanecer en estos estados el menor tiempo posible.

Claramente, el estado de transmisión sólo se requiere cuando se tiene que transmitir una ráfaga de datos. Entre menor sea la ráfaga de datos a transmitir, mayor será el tiempo de vida del nodo. Esto sugiere evitar protocolos basados en complejos mecanismos de señalización (handshake). Sin embargo, el transceptor necesita permanecer en el estado de recepción por un largo tiempo, si no se desarrolla una apropiada calendarización de períodos de transmisión. Los protocolos deben evitar también, en la medida de lo posible, que los nodos reciban información que no es dirigida hacia ellos y que, por lo tanto, les resulta inútil (Ye *et ál.*, 2002).

Por otro lado, algunas veces las técnicas de procesamiento de datos, implementadas en redes de tipo WSN, requieren desarrollar largas tareas de procesamiento en el microprocesador, mucho mayores a la cantidad actual del tiempo que consume un transceptor en el modo de transmisión. Esto puede causar un consumo significativo de energía por parte del microprocesador, aun comparable a la energía consumida durante la transmisión o recepción. Por lo anterior, no puede considerarse válida la regla general de que el diseño de

protocolos de comunicación es mucho más importante que el diseño eficiente de la calendarización de tareas de procesamiento.

Típicamente, el transceptor drena mucho menor energía en el estado inactivo. Por esta razón, el uso apropiado de la batería a menudo requiere largos intervalos de tiempo con el transceptor en estado inactivo (del orden del 95% al 99% del tiempo). Durante este período, no es posible detectar el envío de una ráfaga de datos al nodo. Por lo tanto, el manejo del modo inactivo es un aspecto muy importante para las redes de tipo WSN.

Una consideración final está asociada con el uso de control de potencia. Esta técnica establece el mínimo nivel de potencia de transmisión necesario para permitir la detección correcta de la señal en el receptor, lo cual se utiliza con frecuencia en redes inalámbricas para reducir el impacto de interferencia de transmisiones y de la emisión de ondas de radio con una potencia innecesariamente alta. Sin embargo, establecer el nivel adecuado de potencia requiere información de la ganancia del canal, la cual puede ser difícil de obtener en aplicaciones con muchas ráfagas de transmisión de datos. Por lo tanto, vale la pena cuestionarse si el control de potencia es una técnica útil para redes de tipo WSN.

Analizando la hoja de especificaciones de un transceptor muestra, utilizado en muchas plataformas comerciales tales como CHIPCON CC2420, se pueden derivar las siguientes conclusiones. Al transmitir con el mayor nivel de potencia (0dBm), se drenan aproximadamente 17mA de la batería. En cambio, en el mínimo nivel de potencia (-25dBm), la corriente drenada es de 8.5mA, la mitad de la energía. No existe un considerable ahorro de energía al disminuir el nivel de potencia de transmisión por 25dB.

El consumo de energía en el estado de transmisión no es proporcional a la potencia de transmisión utilizada, por lo tanto el control de potencia no es una técnica que reduzca considerablemente el consumo de energía.

## **II.5. Conectividad y cobertura en WSN.**

Para asegurar que la información recolectada por los nodos sensores pueda llegar al sumidero, o que los diferentes nodos actores puedan lograr una colaboración eficiente, es necesario que no haya grupos de nodos desconectados del resto de la red. Por lo tanto el objetivo de la conectividad es lograr que cualquier nodo alcance a cualquier otro nodo diferente a través de multi-saltos. A esto se le conoce como una red completamente conectada.

La teoría de conectividad estudia la formación de redes de un gran número de nodos, que están distribuidos acorde a algunas estadísticas sobre una región limitada o sin límites, y tiene como objetivo describir el conjunto de enlaces potenciales que pueden conectar a los nodos desplegados en la red, con otros; sujeto a algunas restricciones desde el punto de vista físico (límites de potencia o limitaciones de recursos de radio).

La conectividad depende del número de nodos por unidad de área (densidad de nodos) y de la potencia de transmisión. La selección de un nivel apropiado de transmisión es un aspecto importante en el diseño de redes, debido a que éste afecta la conectividad de la red. De hecho, con un alto nivel de potencia de transmisión se espera alcanzar mayor número de nodos a través de enlaces directos; de manera contraria, un bajo nivel de potencia podría incrementar la posibilidad de que un nodo dado, no pueda alcanzar a otro; es decir, este nodo queda aislado.

La máxima distancia a la cual un nodo puede alcanzar a su vecino es llamada rango de transmisión del nodo. Es importante observar que al variar el rango de transmisión de los nodos, se obtiene una red diferente (esto es topología diferente), la cual mostrará un distinto grado de conectividad.

El propósito del control de topología es encontrar el rango de transmisión óptimo para los nodos sensores, dadas algunas especificaciones en la red (consumo de potencia, capacidad, tiempo de vida de la red). En este sentido, se refiere al rango de transmisión con la mínima potencia radiada, de tal modo que, ofrezca una topología de la red con conectividad completa. Si la potencia de transmisión es la misma para cada nodo se le conoce como rango de transmisión crítico. También, el número de sensores y sumideros que constituyen la red afectan la forma de ésta: la densidad de los nodos es crucial para la conectividad, así como para el rango de transmisión.

## **II.6. Resumen.**

En este capítulo se han presentado los fundamentos asociados con las WSAWs. En este sentido, se presentó una descripción de este tipo de redes desde el punto de vista de un sistema colaborativo, donde un conjunto de elementos (nodos sensores y actores) son capaces de sensor variables físicas, inferir, compartir información y ejecutar tareas acorde a los datos colectados y reportados por los sensores, con el propósito de lograr una meta común.

Acorde a la forma en que los datos son colectados por los sensores y reportados a los actores, se identifican dos tipos de arquitecturas: automática y semiautomática. En la primera, los datos son colectados por los sensores y transmitidos directamente a los actores, los cuales se coordinan para ejecutar tareas específicas sin la colaboración del sumidero. En cambio, en la segunda

arquitectura, los datos sensados son transmitidos a un controlador central (sumidero), el cual procesa los datos colectados y determina qué actores deben participar en la ejecución de una tarea específica. Comparando dichas arquitecturas, la automática ofrece un menor tiempo de respuesta y es más eficiente en energía, lo que provoca un incremento en el tiempo de vida de la red. Además, se describen los niveles de coordinación: Sensor-Sensor, Sensor-Actor y Actor-Actor, que son necesarios para que sensores y actores colaboren entre sí para realizar una acción común.

Considerando la importancia en el uso eficiente de energía en las WSNs, los protocolos de comunicación necesitan ser diseñados acorde a los paradigmas de eficiencia en energía. Una de las estrategias empleadas es mantener al transceptor en estado activo el menor tiempo posible. Por otra parte, hay quienes sugieren el uso de técnicas de control de potencia; sin embargo, no se reduce considerablemente el consumo de energía, debido a que en el estado de transmisión éste, no es proporcional a la potencia de utilizada.

Por último, se aborda el análisis de la densidad necesaria de nodos y el rango de transmisión mínimo, para lograr una red completamente conectada. Con esto se pretende que la información recolectada por los nodos sensores pueda llegar al sumidero; o que los diferentes nodos actores puedan lograr una colaboración eficiente.

## Capítulo III

---

### Taxonomía de Mecanismos de Coordinación

---

#### III.1. Introducción.

A la fecha, no existe una taxonomía para mecanismos de coordinación aplicados a redes WSN. No obstante, existen algunos trabajos relacionados, como el de (Farinelli *et ál.*, 2004), quien presenta una taxonomía para la coordinación de sistemas multi-robot, basada en cuatro niveles: cooperación, conocimiento, coordinación y organización. Sin embargo, esta taxonomía sólo considera sistemas cooperativos conformados por robots y protocolos libres del proceso de toma de decisiones. Otro trabajo relacionado, es el presentado por (Shalkman *et ál.*, 2006), quien propone una taxonomía para sistemas colaborativos conscientes del contexto, basado en los aspectos comunes de diferentes sistemas de este tipo, los cuales enfatizan la colaboración. El inconveniente de esta taxonomía es que es demasiado general y puede ser aplicada a una gran variedad de sistemas: desde artefactos pequeños a sistemas de gran escala y altamente distribuidos (como las redes WSN). Como resultado, la estructura propuesta no provee los elementos necesarios para una clasificación tan específica como la requerida en mecanismos de coordinación para una WSN. La estructura propuesta por (Shalkhman *et ál.*, 2006) está basada en tres ejes: metas, propuestas y medios. Un tercer trabajo (Sameer *et ál.*, 2003) desarrolla un rango de servicios, como sincronización, localización, agregación y rastreo, con la finalidad de facilitar la coordinación a través de la red de sensores auto-organizada. De manera similar (Sameer, *et ál.*, 2003) aborda algunos servicios de coordinación para redes de tipo WSN. Por

último, recientemente se publicó una taxonomía para WSN propuesta por (Iyer *et al.*, 2008), sin embargo esta propuesta se enfoca, particularmente, a la clasificación de aplicaciones de este tipo de redes.

## **III.2. Elementos de la Taxonomía de Mecanismos de Coordinación para WSANs.**

Ante la necesidad de una taxonomía de mecanismos de coordinación para WSAN, se propone una nueva, inspirada en el trabajo de (Salkhman *et al.*, 2006 y Sameer *et al.*, 2003). Esta propuesta está dividida en cuatro secciones: Estructura de WSAN, Procedimientos Colaborativos, Criterios de Desempeño y Requerimientos de la Aplicación. La Figura 7 muestra un diagrama de la taxonomía propuesta.

### **III.2.1. Estructura WSAN.**

Esta categoría incluye la arquitectura de la red, los niveles de coordinación, la movilidad de los nodos y la densidad de la red.

- Arquitectura de la red. Está relacionada con la forma automática o semiautomática en que la información es sensada y reportada a los actores.
- Niveles de coordinación. Se refiere a los niveles Sensor-Sensor, Sensor- Actor y Actor-Actor que son empleados por los mecanismos de coordinación.
- Movilidad de los nodos. Es utilizada para especificar si los nodos en una WSAN (sensores, actores y sumidero) son móviles o fijos.

- Densidad de la red. Define la relación entre el número de nodos esparcidos a través del campo y las dimensiones del mismo. De acuerdo a esta relación, puede ser clasificada como esparcida o densa.

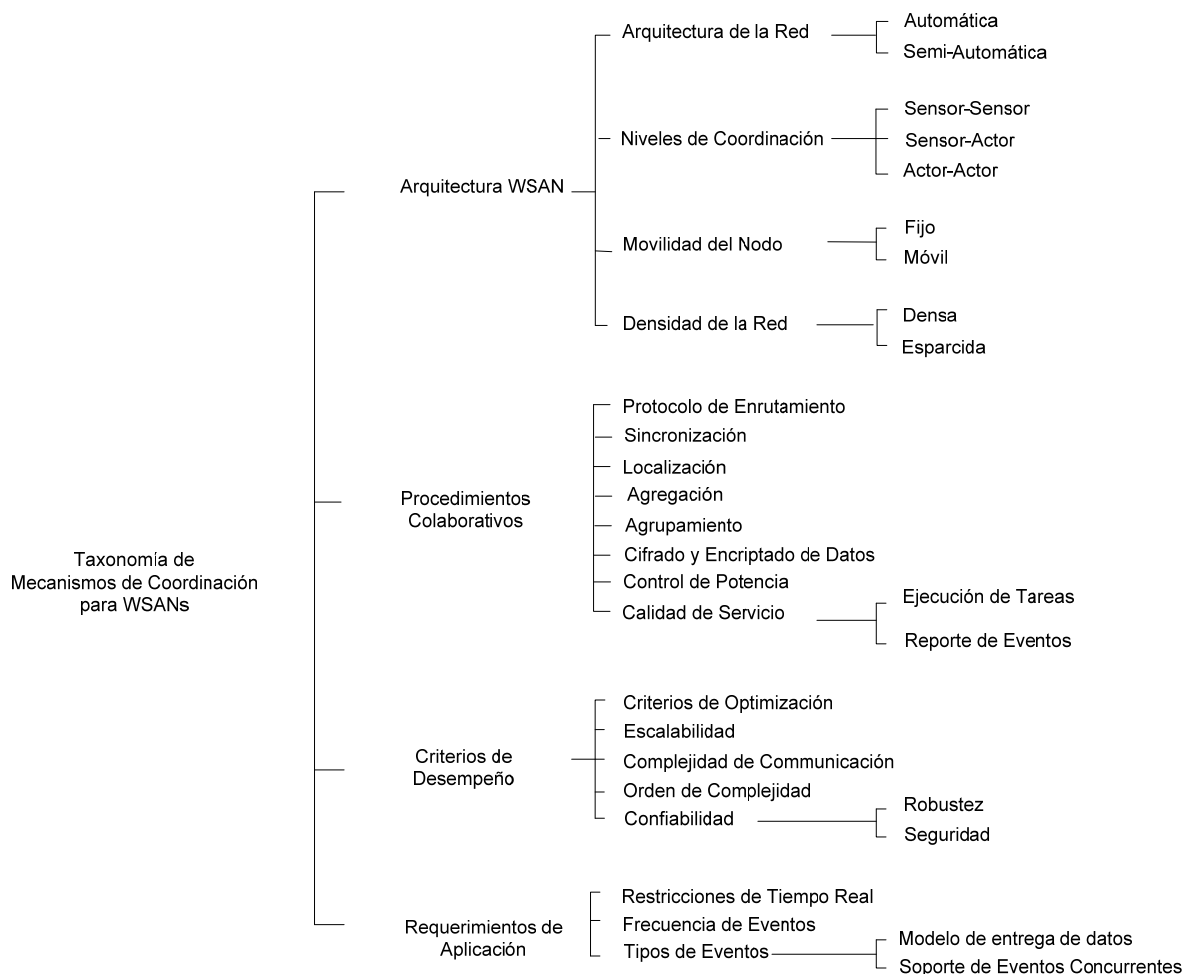


Figura 7. Taxonomía de Mecanismos de Coordinación para WSAN's.

### III.2.2. Procedimientos Colaborativos.

Son los procedimientos o servicios entre los elementos de una WSAN, que se emplean para facilitar el intercambio de información necesaria para llevar a cabo



los mecanismos de coordinación. Estos servicios incluyen: mecanismos de enrutamiento, sincronización, agregación, localización, agrupamiento (“*clustering*”), control de potencia, calidad de servicio (QoS), cifrado y/o encriptación de datos.

- *Mecanismo de enrutamiento*. Se refiere al procedimiento de selección de ruta para transmitir paquetes al destino. La implementación de un tipo específico de protocolo de enrutamiento puede variar en cada nivel de coordinación.
- *Sincronización*. Consiste en la aplicación de técnicas eficientes en energía requeridas para asociar una estampa de tiempo a los datos sensados.
- *Agregación*. Tiene el objetivo de reducir el consumo de energía y controlar la sobrecarga asociada, con la transmisión de información a un destino común. Para lograr dicho objetivo, se crea un solo paquete como resultado de la fusión de datos generados por múltiples fuentes. Esta estrategia reduce la carga de tráfico en la red.
- *Localización*. Es implementada para proveer información de posición geográfica de los nodos sensores y actores, la cual se puede lograr por medio de un receptor GPS o a través de técnicas de trilateración. Esta información de localización estará también asociada a los datos sensados.
- *Agrupamiento (clustering)*. Provee una jerarquía entre nodos. Las estructuras formadas por un conjunto de nodos vecinos son llamados grupos o “*clusters*” y existe al menos un nodo de ese conjunto, que opera como líder del grupo. El agrupamiento usualmente es una técnica efectiva para incrementar el tiempo de vida de la red. Algunos beneficios adicionales son la escalabilidad, el balance de cargas, así como la posibilidad de implementar una estrategia de enrutamiento jerárquico.

- Control de potencia. Se refiere a la posibilidad de variar la potencia de transmisión. Como resultado, la cobertura de la señal de radio de un nodo puede ser modificada.
- Calidad de Servicio (QoS). Hace alusión a los mecanismos empleados para proveer servicios garantizados en una arquitectura WSN, acorde a los requerimientos de la aplicación. En un escenario WSN, es posible definir dos diferentes funcionalidades para proveer soporte de QoS. Una funcionalidad está basada en proveer la reservación de recursos requeridos por los nodos involucrados en el reporte de eventos en el nivel sensor-actor; de esta forma es posible proveer servicios diferenciados para la transmisión de datos en la WSN. Otra funcionalidad es priorizar la ejecución de tareas realizadas por los actores, en respuesta a los eventos en la WSN. Por lo tanto, los actores deben ser capaces de responder acorde a la prioridad del evento reportado por los sensores.
- Cifrado de datos. Está relacionada con la implementación de cualquier mecanismo utilizado para proteger la integridad o la privacidad de los datos en la WSN.

### **III.2.3. Criterios de Desempeño.**

Son parámetros para estimar el desempeño de los mecanismos de coordinación, tales como:

- Parámetros de optimización. Denota aquellas métricas en las que se basa el mecanismo para alcanzar el objetivo propuesto.

- Orden de complejidad. Provee una medida de la complejidad computacional de los algoritmos propuestos.
- Confiabledad. Provee una medida del nivel de seguridad y robustez de un mecanismo de coordinación para WSAN. Para clasificar un mecanismo de coordinación como seguro, este debe implementar funcionalidades adicionales para garantizar la integridad de los datos y evitar el acceso de intrusos a la WSAN. Por otra parte, la robustez consiste en la capacidad de los mecanismos de coordinación para corregir las fallas, mientras asegura la entrega de datos desde los sensores a los actores por medio de acuses de recibo o procedimientos de retransmisión.

#### **III.2.4. Requerimientos de la Aplicación.**

Los mecanismos de coordinación deben tomar en cuenta los requerimientos de la aplicación. Algunos incluyen restricciones en tiempo real, frecuencia del evento y la posibilidad de atender eventos concurrentes.

- Restricciones en tiempo real. Se refiere a la cantidad de tiempo requerido por los mecanismos de coordinación, para reportar eventos y ejecutar una tarea. Dependiendo de los requerimientos de la aplicación, el mecanismo de coordinación puede necesitar reportar eventos y ejecutar tareas en tiempo real con bajo retardo, mientras que otras aplicaciones quizá no imponen restricciones de tiempo real.
- Frecuencia del evento. Es la periodicidad del evento, bajo la cual el sistema es capaz de proveer una respuesta adecuada.
- Tipo de evento. El tipo de eventos se puede clasificar en términos del modelo de entrega de datos sensados y el número de eventos concurrentes. Es posible

identificar cuatro tipos: continuos, manejados por eventos, iniciados por el observador e híbridos. En los eventos de tipo continuo, los sensores reportan sus lecturas a una tasa determinada. En los manejados por evento, los sensores informan a la aplicación cuando ocurren ciertos eventos. En los iniciados por un observador, los sensores responden a los requerimientos de la aplicación. Finalmente las propuestas híbridas implementan una mezcla de cualquiera de las tres propuestas previas. En cuanto al número de eventos, éstos pueden ser clasificados como eventos sencillos o múltiples eventos concurrentes. Es decir, el *soporte de eventos concurrentes* alude a la capacidad de los mecanismos de coordinación para soportar eventos simultáneos en una WSAN, sin mermar el desempeño de ésta.

### **III.3. Análisis Comparativo.**

A continuación se presenta una comparación de los cinco mecanismos de coordinación más representativos publicados a la fecha. Esta comparación está basada en la taxonomía propuesta en la sección III.2, la cual está dividida en cuatro secciones. En la Tabla I se muestra un resumen del análisis comparativo para cada uno de los elementos de la taxonomía mencionada. Las propuestas de mecanismos de coordinación son referidas utilizando la siguiente notación: el trabajo presentado por Melodia *et ál.*, 2005 y Melodia *et ál.*, 2007 es referenciado como *A*; la estructura propuesta por Ngai *et ál.*, 2006 es referida como *B*; el mecanismo de coordinación provisto por Haidong *et ál.*, 2006 es referido como *C*; la propuesta presentada por Shah *et ál.*, 2006 es referenciada como *D*; y la arquitectura desarrollada por Melodia *et ál.*, 2006 es referida como *E*. El análisis comparativo se llevó a cabo examinando detalladamente cada uno de los mecanismos de coordinación mencionados, para así, determinar si consideraban o no los elementos descritos en la taxonomía utilizada y, en qué forma eran éstos aplicados, ya que la mayoría de las propuestas no lo mencionan explícitamente, o utilizan nomenclatura diferente para referirse a un mismo término.

### III.3.1. Estructura WSAN.

La Tabla I, muestra el análisis comparativo para esta sección.

Tabla I. Comparación de la Arquitectura WSAN.

Arquitectura WSAN	<i>Propuestas de Mecanismos de Coordinación</i>				
	A	B	C	D	E
Arquitectura de Red					
Automática	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Semi-Automática	No	No	No	Sí	No
Nivel de Coordinación					
Sensor-Sensor	No	Sí	Sí	Sí	No
Sensor-Actor	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Actor-Actor	Sí	Sí	Sí	No	Sí
Mobilidad del Nodo					
Sensor	Fijo	Fijo	Fijo	Fijo	Fijo
Actor	Fijo	Móvil	Móvil	Móvil	Móvil
Sumidero	-	-	-	Fijo	-
Densidad de la Red	Densa Esparcida	Densa	Densa	Densa Esparcida	Densa

- Arquitectura WSAN. En la Tabla I, es posible observar que todos los mecanismos de coordinación analizados soportan una arquitectura automática, debido a la baja latencia producida por la comunicación directa entre sensores y actores. En la propuesta D, los autores presentan un mecanismo de coordinación y lo evalúan utilizando ambas arquitecturas, automática y semiautomática. Acorde a los autores, la arquitectura automática requiere menos tiempo de configuración, opuesto a la arquitectura semiautomática. Por otro lado, en la arquitectura semiautomática, el retardo promedio en la entrega de paquetes se incrementa con el número de nodos sensores en la red, debido a que el sumidero es el único elemento capaz de proveer la coordinación necesaria por el líder de grupo (“cluster-head”) y los actores.

- Niveles de coordinación soportados. Los niveles de coordinación soportados por cada propuesta difieren entre sí. En la propuesta A, no se realizan las funciones de coordinación del nivel Sensor-Sensor, debido a que los sensores proceden a asociarse con un actor inmediatamente después de la detección de un evento; de esta forma, los sensores forman grupos con el actor como líder de grupo. Es decir, los procesos de formación de grupos y agregación de datos son realizados entre nodos sensores y actores y no entre sensores únicamente. Por su parte, los mecanismos de coordinación propuestos por B y C, soportan la implementación de los tres niveles de coordinación, Sensor-Sensor, Sensor-Actor y Actor-Actor, en cambio, la propuesta D no considera procedimientos que definan la colaboración entre actores, por lo que el nivel de coordinación Actor-Actor está fuera del alcance de esta propuesta, abordando únicamente los primeros dos niveles de coordinación, Sensor-Sensor y Sensor-Actor. En la literatura, los autores utilizan diferente nomenclatura para describir los niveles de coordinación soportados por el mecanismo de coordinación propuesto, tal es el caso de las propuestas B y D. En B, la arquitectura implementa técnicas de agrupamiento y agregación de datos entre sensores y los datos correspondientes a cada grupo son reportados al actor más cercano. Esto es referido como notificación de evento de sensor-sensor y sensor-actor respectivamente, lo cual, evidentemente, implica las funciones de coordinación Sensor-Sensor y Sensor-Actor. Por su parte, en la propuesta D, los sensores son concentrados en grupos y el retardo promedio de los paquetes se estima mediante el protocolo DAWC (*Dynamic Weighted Clustering Algorithm*). Todas estas tareas están relacionadas con el nivel de coordinación Sensor-Sensor. En relación a la propuesta E, el mecanismo de coordinación opera en los niveles de coordinación Sensor-Actor y Actor-Actor; debe observarse que esta propuesta considera actores móviles y fue desarrollada como una extensión de la propuesta A.
- Movilidad de los nodos. Todas las propuestas estudiadas consideran que los nodos sensores son fijos, (es decir, los sensores no se mueven) y la mayoría, con

excepción de la propuesta A, afirman que los actores son móviles. Sin embargo, recientemente los autores de la propuesta A, han publicado una versión actualizada, donde también consideran que el actor es móvil. Si se utilizan actores móviles es posible considerar un rango más amplio de aplicaciones para WSN, a expensas de un incremento en la complejidad de los mecanismos de coordinación.

- Densidad de la red. En relación a la densidad de la red, todas las propuestas son capaces de operar en topologías con una alta densidad. Sin embargo, algunas de ellas no mencionan explícitamente esta capacidad, como la propuesta B. No obstante, se considera que B es escalable debido a que la propuesta utiliza técnicas de agrupamiento y agregación de datos durante el reporte del evento. Respecto a la propuesta D, los autores explícitamente describen que ésta tiene un adecuado desempeño tanto en redes densas como en redes esparcidas al igual que la propuesta A.

### **III.3.2. Procedimientos colaborativos.**

La Tabla II presenta la comparación de los mecanismos de coordinación al analizar estos procedimientos.

- Protocolo de enrutamiento. La mayoría de los mecanismos de coordinación utilizan protocolos de enrutamiento geográficos, debido a su escalabilidad y al hecho de que éstos pueden fácilmente adaptarse a los cambios de posición de los nodos actores (Ngai *et ál.*, 2006); además es posible explotar la información de localización de los nodos durante el enrutamiento de paquetes hacia los nodos destino, acorde a la localización de los nodos dentro del área del evento. En las propuestas A, B y E, la coordinación Sensor-Actor está basada en el paradigma de enrutamiento geográfico, mientras que la propuesta presentada en C, utiliza el protocolo de enrutamiento GAF (*Geographical Adaptive Fidelity*) en el primer nivel de coordinación (Sensor-Sensor); de esta forma, los nodos sensores pueden

utilizar la información de localización geográfica para transmitir los datos al líder de grupo (*“cluster-head”*), el cual, a su vez, retransmite los datos al actor más cercano. Además, C propone el uso de protocolos de enrutamiento Ad-hoc convencionales en el último nivel de coordinación (Actor-Actor), dado el número reducido de nodos actores y a sus capacidades de desempeño superiores. Por otro lado, D propone la implementación de un protocolo de enrutamiento consciente de energía y retardo, tal como el protocolo DEAR (*Delay-Constrained Energy Aware Routing*), para transmitir los datos al sumidero (en escenarios con arquitectura semiautomática) o a los actores (en escenarios con arquitectura automática). En el escenario semi-automático, D propone la implementación de un protocolo centralizado DEAR (C-DEAR), mientras que para arquitecturas automáticas éste implementa una versión distribuida del protocolo DEAR (D-DEAR); estas dos implementaciones son diseñadas para satisfacer los requerimientos de retardo extremo-extremo, para aplicaciones en tiempo real. En la propuesta E, los autores derivan una regla de retransmisión óptima, basada en la posición geográfica, en presencia de canales con desvanecimiento Rayleigh. La regla de retransmisión geográfica es óptima desde el punto de vista del consumo de energía.

- Sincronización. Las técnicas de sincronización sólo son implementadas en las propuestas A, C y D; las propuestas B y E no hacen ninguna referencia a los requerimientos de un mecanismo de sincronización. En A, se considera que la red está sincronizada por medio de la implementación de protocolos de sincronización existentes (Sundaraman *et ál.*, 2005). En C, los actores periódicamente transmiten sus coordenadas geográficas utilizando etiquetas de tiempo. Esta información permite al líder de grupo (*“cluster-head”*) sincronizarse con los actores. En D, la implementación asume que el canal es asimétrico y los autores establecen que no se requiere de un mecanismo de sincronización. En este caso, los autores se refieren a los mecanismos de sincronización de enlaces y no necesariamente hacen referencia a los requerimientos de un mecanismo de sincronización en



tiempo. Sin embargo, se considera que D implementa un mecanismo de sincronización en tiempo, debido a que se realiza una medición del retardo del paquete en el receptor, lo que implica que los paquetes son etiquetados con información de tiempo. Con respecto a la propuesta E, ésta no hace referencia explícita a los requerimientos de técnicas de sincronización. Sin embargo, se considera que requiere un servicio de sincronización, debido a la estimación de posición de los actores, la cual se realiza durante intervalos específicos de tiempo.

Tabla II. Procedimientos Colaborativos.

Procedimientos Colaborativos	Propuestas de Mecanismos de Coordinación				
	A	B	C	D	E
Protocolo de Enrutamiento	Geográfico	Geográfico	GAF (SS) Ad-hoc (AA)	C-DEAR D-DEAR	Geográfico
Sincronización	Sí	N.D	Sí	Sí	Probable
Localización	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Agregación	Sí	Sí	Sí	N.D	N.D
Agrupamiento	Por evento	Por evento	Jerárquico Geográfico	Dinámico Pesos	N.D
Cifrado / Encriptado	No	No	No	No	No
Control de Potencia	Sí	No	No	No	Sí
QoS					
Reporte de Eventos	Sí	No	No	No	Sí
Ejecución de Tareas	No	No	No	Sí	Sí


N.D.: No Definido.

- Localización de los nodos. El servicio de localización es considerado en todas las propuestas analizadas. Se considera que todos los nodos son capaces de conocer o determinar su posición geográfica; esto se puede implementar por medio de un receptor GPS, a través de técnicas de trilateración o propuestas similares. En la propuesta E, los autores hacen referencia a un esquema de administración de localización híbrido para manejar la movilidad de los actores con

el mínimo consumo de energía, basado en el envío de mensajes de actualización por los actores hacia los nodos sensores. Acorde a E, la solución propuesta es adecuada para aplicaciones WSN y supera las desventajas de los servicios de localización propuestos previamente en la literatura. Los actores difunden una actualización de su posición y limitan su rango de transmisión basado en diagramas de Voronoi, mientras que los sensores predicen el movimiento de los actores basados en el filtrado Kalman de actualizaciones recibidas previamente. Este esquema no considera una técnica particular de localización para el actor (por ejemplo GPS, filtros etc.), con la finalidad de mantener la generalidad del modelo.

- Agregación. La fusión de datos es implementada en A, B y C, mientras que D y E no lo especifican. En A, la fusión de datos sólo se implementa en el nivel de coordinación Sensor-Actor, es decir, cuando un sensor recibe información de al menos otros dos sensores, los datos son retransmitidos hacia el actor en un sólo paquete. En B, la fusión de datos es implementada en el nivel de coordinación Sensor-Sensor y, posteriormente dividida en diferentes capas acorde a su importancia; los datos agregados son transmitidos al actor más cercano según el orden de importancia. En C, la fusión de datos es implementada en los tres niveles de coordinación, esto es, el líder de grupo desarrolla la fusión de los datos recibidos de sus nodos miembros, (fusión en el primer nivel); en el nivel de coordinación Sensor-Actor todos los líderes de grupo asociados al mismo actor construyen un árbol de agregación de datos hacia el actor; y finalmente, en el nivel de coordinación Actor-Actor, todos los actores activados por un evento común, construyen un tercer árbol de agregación hacia el actor localizado en el centro del área del evento.
- Agrupamiento o clustering. Técnicas de formación de grupos ("*clusters*") son implementadas en las propuestas A, B, C y D; por el contrario, E no hace uso de estas técnicas. Con respecto a las propuestas A y B, ambas implementan el

paradigma de agrupamiento (“*clustering*”) manejado por evento. En este paradigma, el proceso de formación de grupos es activado por la ocurrencia de un evento, es decir, los grupos son creados cada vez que ocurre un evento. Los algoritmos de formación de grupos reactivos tienen la desventaja de que consumen tiempo valioso durante la formación de grupos, como resultado de la ocurrencia de un evento. Por lo tanto, para aplicaciones en tiempo real, no es recomendable la arquitectura basada en eventos (Shah *et ál.*, 2006). La propuesta C está basada en el paradigma de agrupamiento geográfico, donde los grupos son formados segmentando el área en secciones pequeñas para crear rejillas virtuales; esta estrategia reduce la carga de tráfico dentro de cada rejilla y hace un uso eficiente de los recursos. Finalmente, D propone un algoritmo de agrupamiento DAWC, el cual se adapta a la topología dinámica de la red; el procedimiento de formación de grupos no es periódico y está basado en una ecuación que establece pesos para diferentes parámetros acorde a las necesidades de la aplicación.

- Control de potencia. Los mecanismos de control de potencia son implementados en la propuestas A y E. La propuesta A, emplea el control de potencia en los actores, los cuales seleccionan su potencia de transmisión entre diferentes  niveles para desarrollar la tarea. El nivel de potencia superior corresponde a un menor tiempo en la ejecución de una tarea. Por otro lado, la propuesta E, emplea el control de potencia en el nivel de coordinación Sensor-Actor, donde los sensores pueden incrementar el rango de transmisión dentro de un rango eficiente en energía, con la finalidad de ajustar el retardo extremo-extremo, cuando el tráfico generado en el nodo es bajo o moderado. Además, en las propuestas de administración de localización, los actores actualizan su posición transmitiendo un mensaje a los sensores dentro de su celda de Voronoi y regulan su potencia para limitar la interferencia justo en los puntos más alejados de su celda de Voronoi.

- Cifrado y/o encriptado de datos. Ninguno de los mecanismos de coordinación analizados hacen uso de algún mecanismo de seguridad como el cifrado o encriptado para proteger la integridad de los datos. Como se puede observar, ésta es un área de oportunidad en el desarrollo de mecanismos de coordinación, los cuales pueden incorporar técnicas de cifrado o encriptado.
  
- Calidad de Servicio (QoS). En relación a la QoS, es posible identificar dos diferentes funcionalidades. La primera de ellas está relacionada con el soporte de diferentes prioridades en la transmisión de datos durante el reporte de eventos de los sensores a los actores. La segunda, se refiere a la asignación de prioridades en la ejecución de tareas de los actores. La prioridad de las tareas dependerá de los requerimientos de la aplicación.
  - Prioridad en la transferencia de datos. Las propuestas A, D y E implementan un esquema de prioridades para la transferencia de datos. La propuesta A introduce el concepto de “*umbral de confiabilidad del evento*”, definido como la latencia mínima requerida por la aplicación. Este concepto es utilizado para garantizar que la confiabilidad observada esté por encima de la latencia mínima requerida (umbral de confiabilidad del evento). A través del protocolo DEPR (*Distributed Event-driven Partitioning and Routing*), la propuesta A satisface la confiabilidad requerida con el mínimo consumo de energía, tal como se describe en (Melodia *et ál.*, 2007). Por su parte, la propuesta D, presenta el algoritmo de agrupamiento DAWC, el cual estima el retardo límite para retransmitir un paquete desde el líder de grupo, dentro de los límites de retardo establecidos. El protocolo de enrutamiento implementado DEAR es capaz de soportar la entrega de paquetes en tiempo real, debido a que el criterio de selección de ruta está basado en el retardo del paquete y en el balance del consumo de energía de los nodos sensores (Shah *et ál.*, 2006). La propuesta E, al igual que A, utiliza el concepto de confiabilidad, sin embargo, el requerimiento de confiabilidad se logra ajustando el retardo extremo-extremo por medio de un

mecanismo de control de potencia cuando el tráfico generado en el área del evento es bajo y, a través de un esquema de control de congestión en casos de alta tasa de tráfico. Las propuestas C y B se enfocan en reducir la latencia durante el reporte del evento, pero no implementan un esquema de prioridad para soportar diferentes requerimientos según la aplicación. Por ejemplo, en la propuesta B, los sensores (durante el reporte del evento) transmiten primero un mensaje de notificación de evento general, y tiempo después envían los detalles del evento hacia los actores; esto permite a los actores obtener una imagen aproximada del evento en el menor tiempo posible. No obstante, la propuesta B no implementa ningún esquema de prioridad que provea garantía alguna en los mensajes transmitidos hacia los actores.

o Prioridad en la asignación de tareas. En este sentido, las propuestas C y E utilizan técnicas para asignar prioridades a las tareas ejecutadas por los actores. La propuesta C, activa a uno o más actores para desarrollar una o varias tareas, acorde a las características del evento. En el nivel de coordinación Actor-Actor, C propone un esquema de prioridad de acciones (Action First - AF), donde los actores que reciben la información del evento ejecutan la acción sin negociar con actores lejanos. Los actores involucrados en la asignación de tareas, informan la ocurrencia del evento al resto de los actores, de esta forma, los actores deciden unirse o retraerse de la ejecución de tareas de manera independiente. Este proceso de decisión está basado en la evaluación de diferentes factores, tal como la prioridad asignada a las tareas, acorde al procedimiento definido en la propuesta C. En la propuesta E, el proceso de asignación de tareas se logra a través de MINLP (*Mixed Integer Non-Linear Program*), donde el evento es caracterizado por una tupla que describe el tipo de evento: prioridad, área del evento, alcance e intensidad y los límites para completar la acción. Las características de un evento permiten la selección de un equipo de actores y su velocidad es definida para óptimamente dividir la carga de trabajo de la acción, esto ayuda a minimizar la energía

requerida para completar la acción, mientras no exceda el límite de retardo requerido. Además, el mecanismo de coordinación Actor- Actor propuesto por E, incluye una política para la asignación de tareas multi-actores, para casos donde los recursos son insuficientes para completar una tarea de alta prioridad.

### III.3.3. Criterios de desempeño.

Se refiere a aquellos elementos utilizados para estimar el desempeño del mecanismo de coordinación. La Tabla III muestra un resumen del análisis comparativo de los criterios de desempeño empleados por diferentes propuestas.

Tabla III. Criterios de Desempeño.

Criterios de Desempeño	Propuestas de Mecanismos de Coordinación				
	A	B	C	D	E
Criterios de Optimización	Energía Latencia Pérdida de paquetes	Energía Latencia	Energía Latencia	Energía Latencia	Energía Latencia Pérdida de paquetes
Escalabilidad	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Orden de Complejidad	-	-	-	-	-
Complejidad de Comunicación	-	-	-	-	-
Confiabilidad					
Seguridad	No	No	No	No	No
Robustez	No	No	No	No	No

- Criterios de optimización. Todas las propuestas hacen uso de parámetros de energía y latencia como métricas de optimización; en la propuesta A, la máxima latencia permitida (retardo entre la detección del evento y la recepción de esta información en los actores) es definida como confiabilidad. Además de este

parámetro, las propuestas A y E miden la tasa de pérdida de paquetes. Debido a la naturaleza de las WSANs y a sus limitantes en recursos, es obvio que los mecanismos de coordinación pretendan reducir el consumo de energía de los nodos, mientras intentan reducir el retardo relacionado con el reporte del evento y la ejecución de tareas. De esta forma, es posible incrementar el tiempo de vida de la red y al mismo tiempo garantizar una respuesta oportuna al reporte de eventos.

- Escalabilidad. Las propuestas A, B, C y E utilizan protocolos de enrutamiento geográfico, debido a que éstos ofrecen soluciones escalables para redes de sensores con limitaciones en energía. Por otra parte, las propuestas A, B, C y D utilizan esquemas de agrupamiento los cuales promueven la escalabilidad y hacen un uso eficiente de la energía en la red.
- Orden de complejidad. Ninguna de las propuestas provee un análisis claro de la memoria y los recursos computacionales requeridos para soportar el mecanismo de coordinación propuesto. En relación a las propuestas D y E, estas proveen una medida del orden de complejidad para algunos aspectos del mecanismo de coordinación. Sin embargo, ninguna de las propuestas provee un análisis completo que ayude a determinar el orden de complejidad del mecanismo de coordinación en general. Por su parte, la propuesta D describe que el costo del proceso de señalización utilizado en C-DEAR es  $O(n)$ , donde  $n$  es el número de sensores. Este puede ser considerado el costo actual incurrido en la construcción de una ruta del nodo fuente al nodo sumidero. En la propuesta E, los autores sólo hacen referencia al hecho de que el consumo de energía en el algoritmo de administración de posición, se incrementa en función de  $O(n)$ , considerando que los actores son capaces de alcanzar a un salto a todos los sensores en su celda de Voronoi.
- Confiabilidad. Este elemento está relacionado con la seguridad y la robustez del mecanismo de coordinación.

○ Seguridad. Con respecto a la seguridad, ninguno de las propuestas utilizan algún procedimiento que garanticen la integridad de los datos o evite el acceso a la red por parte de intrusos.

○ Robustez. Con respecto a la robustez, ninguna de las propuestas implementan o proponen algún procedimiento para garantizar la tolerancia a fallos. Algunas propuestas sólo miden la tasa de pérdida de paquetes y muestran cómo el algoritmo implementado para reducir la latencia, también ayuda a reducir la tasa de pérdida de paquetes. Sin embargo, no se propone ningún procedimiento que garantice la entrega de paquetes, a través del uso de mensajes de reconocimiento ACK o la retransmisión de información.

### III.3.4. Requerimientos de la aplicación.

El mecanismo de coordinación debe tomar en consideración los requerimientos de la aplicación. La Tabla IV muestra un resumen del análisis comparativo de este rubro.

Tabla IV. Requerimientos de la Aplicación.

Requerimientos de Aplicación	Propuestas de Mecanismo de Coordinación				
	A	B	C	D	E
Restricciones de Tiempo real	No	No	Sí	Sí	No
Frecuencia del evento	Baja	Baja	Alto	Alto	Alto
Tipo de Evento					
Modelo de entrega	Evento	Evento	Evento	Evento	Evento
Eventos concurrentes	No	No	Sí	Sí	Sí

- Limitantes en tiempo. En general los mecanismos de coordinación soportan aplicaciones en tiempo real, debido a que éstos promueven la reducción de latencia durante el reporte del evento y la ejecución de tareas. Sin embargo, las



propuestas A, B y E introducen un retardo de configuración de la red debido al esquema de agrupamiento basada en eventos, por lo que ninguna de éstas propuestas reducen la latencia del reporte del evento. Como resultado, éstas propuestas no son recomendables para aplicaciones en tiempo real.

- Frecuencia del evento y tipo de evento. Con respecto a la frecuencia de eventos que puede soportar el mecanismo de coordinación, las propuestas A y B no son capaces de proveer una operación eficiente bajo escenarios con alta frecuencia de eventos, así como tampoco en escenarios que involucran múltiples eventos concurrentes. Esto se debe a las limitantes impuestas por el paradigma de agrupamiento basado en eventos. Las propuestas de agrupamiento basadas en eventos, desperdician tiempo valioso durante el proceso de configuración, el cual es utilizado para formar grupos y crear árboles de agregación; consecuentemente, no es posible proveer una respuesta oportuna al reporte del evento. En cuanto a las propuestas C, D, y E, éstas son capaces de operar en escenarios con eventos frecuentes, así como en escenarios que involucran múltiples eventos simultáneos.

### **III.4. Resumen.**

En este capítulo se analizaron las diferentes estrategias de cooperación que se implementan en los nodos de una WSAN, con el propósito de lograr un sentido distribuido y la ejecución de tareas acorde a los datos sentidos. La principal contribución, en este capítulo, se relaciona con la propuesta de una taxonomía de mecanismos de coordinación para arquitecturas WSAN; la taxonomía provee una estructura adecuada para los requerimientos de mecanismos de coordinación diseñados para ambientes WSAN. La taxonomía propuesta está compuesta de cuatro secciones: Estructura de WSAN, Procedimientos Colaborativos, Criterios de Desempeño y Requerimientos de la Aplicación.

Adicionalmente, se realizó un análisis comparativo de los mecanismos de coordinación más representativos publicados en la literatura. En general, los mecanismos propuestos segmentan el área del evento y llevan a cabo una coordinación jerárquica, empleando información de localización, con el objetivo de seleccionar a los nodos apropiados (sensores y actores) que deberán reaccionar en respuesta al evento específico con el menor retardo posible. Las aplicaciones propuestas para cada mecanismo de coordinación difieren respecto a la frecuencia del evento. En general, los mecanismos de coordinación propuestos intentan satisfacer los requerimientos de tiempo real, considerando el uso eficiente de la energía en una WSN. Como nota final, ninguna de las propuestas analizadas implementa un mecanismo que garantice la seguridad de los datos y la robustez del sistema.

## Capítulo IV

---

### Mecanismo de Coordinación para WSN basado en Control de Localización y Agrupamiento Balanceado

---

#### IV.1. Introducción.

A la fecha se han propuesto varios mecanismos de coordinación para redes WSN, los cuales no implementan algunos aspectos descritos en la taxonomía presentada en el capítulo III. La mayoría de estas propuestas involucran la formación de grupos, que permiten directamente la agregación de datos en el líder de grupo. Sin embargo, dichos algoritmos son adecuados para ambientes relativamente estáticos, donde la estructura del grupo se mantiene sin cambios por largo tiempo, pero pueden ser frágiles cuando se utilizan en ambientes más dinámicos, como es el caso de WSN con actores móviles, donde el costo requerido para mantener la estructura jerárquica suele ser con frecuencia considerable. Algunos trabajos se han enfocado en este problema, pero aún se requieren esfuerzos para mantener la funcionalidad de la red bajo movilidad (Fasolo, *et ál.*, 2007).

Este capítulo presenta un mecanismo de coordinación que organiza a los nodos sensores para formar grupos, donde el líder es seleccionado de un conjunto de actores móviles. La propuesta considera la movilidad de los actores e implementa un mecanismo para cambiar dinámicamente la posición geográfica de éstos,

mientras intenta reducir la carga en términos del número de sensores dentro del grupo, con el propósito de extender el tiempo de vida de la red.

## **IV.2. Diseño del mecanismo de coordinación propuesto.**

A continuación se describen los elementos que caracterizan al mecanismo de coordinación propuesto, utilizando como marco de referencia la Taxonomía analizada en el capítulo III.

### **IV.2.1. Arquitectura WSAN.**

Acorde a los aspectos relacionados con la Arquitectura WSAN, el mecanismo propuesto opera bajo una *arquitectura de red* automática, con el propósito de ofrecer un sistema capaz de actuar en aplicaciones que demandan tiempo de respuesta reducido. Las funciones de dicho mecanismo son definidas en los niveles *Sensor-Sensor* y *Sensor-Actor*, dejando como trabajo futuro la coordinación a nivel *Actor-Actor*. Por último, se considera un escenario con sensores fijos y actores móviles, distribuidos de manera aleatoria en el campo, y con una densidad tal, que promueve la conectividad de los nodos con una alta probabilidad.

Dado que las redes de tipo WSANs son redes que necesitan ser auto configurables, esta propuesta se enfoca precisamente en plantear cómo una red de tipo WSAN, una vez desplegada, se puede auto configurar, de tal manera que los nodos actores se posicionen convenientemente y los nodos sensores se asocien a uno de los actores más cercanos (en distancia euclidiana), manteniendo el mejor balance posible en cuanto al número de nodos asociados a cada actor. El objetivo de esta configuración no es proteger a los actores respecto a su consumo de potencia, sino reducir el número de saltos que necesita viajar la información

generada por los nodos sensores, en su camino hacia el actor correspondiente, lo que a su vez, reduce el consumo global de energía y el retardo que experimentan los datos desde su origen hasta que llegan al actor. En este sentido, se explota la movilidad de los actores para posicionarlos en el lugar más conveniente, según la topología de la red. Es decir, los actores actualizan su posición cada vez que los cambios en la topología de la red demandan una reconfiguración de la misma.

#### **IV.2.2. Procedimientos colaborativos.**

Respecto a los puntos involucrados con procedimientos colaborativos, como protocolo de enrutamiento se utiliza el protocolo de multi-trayectorias propuesto por (Gallardo López, *et ál.*, 2007) y adaptado para escenarios con múltiples actores. Se emplea una técnica de agregación de datos sin reducción en el tamaño del paquete (Fasolo *et ál.*, 2007), en la que los datos recibidos por dos o más fuentes se transmiten en un sólo paquete sin realizar procesamiento alguno, con la finalidad de reducir la sobrecarga en la red. Además, se desarrolla un algoritmo para la formación dinámica de grupos, acorde a la posición de los nodos en la red.

Para determinar la localización de los nodos, se considera el uso de técnicas de trilateración conocidas, a través de actores equipados con GPS. Sin embargo, los algoritmos de trilateración no se implementan en la propuesta, sólo se considera que se conoce la posición de los nodos, y se propone como trabajo futuro la implementación de éstos. En cuanto a la sincronización de los nodos, se considera el empleo de mecanismos existentes, pero éstos no se especifican ni implementan en el mecanismo propuesto.

Otros de los aspectos no abordados en este trabajo son el cifrado de datos y el uso de técnicas de control de potencia. Estas últimas, establecen la mínima potencia de transmisión necesaria para una correcta detección de la señal en el

receptor y, se emplean con frecuencia en redes inalámbricas para reducir el impacto de interferencias de transmisión. Sin embargo, como ya se mencionó en el capítulo II, el control de potencia no es una técnica eficiente para reducir el consumo de energía (Verdone *et ál.*, 2008).

### **IV.2.3. Criterios de desempeño.**

En cuanto a los criterios de desempeño, se establece que el mecanismo propuesto debe ser escalable y robusto. La robustez es provista a través del descubrimiento de rutas alternas de cada uno de los nodos sensores hacia su actor asociado, cuyo procedimiento es desarrollado por el protocolo de enrutamiento utilizado (Gallardo López, *et ál.*, 2007).

Para el orden de complejidad no se define un criterio de diseño que lo involucre y lo mida cuantitativamente.

Finalmente, dentro de los criterios de optimización se definen como tal, el consumo de energía, la tasa de pérdida de paquetes y el retardo extremo-extremo, a través de los cuales se evalúa el desempeño del sistema.

### **IV.2.4. Requerimientos de la aplicación.**

Como parte de los requerimientos de la aplicación, se establece que el mecanismo propuesto debe soportar restricciones en tiempo, estipuladas por el tipo de tráfico a transmitir, además debe ser independiente de la frecuencia del evento y soportar eventos concurrentes.

### **IV.3. Etapas del Mecanismo de Coordinación Propuesto.**

El mecanismo propuesto consta de cinco etapas, mostradas en la Figura 8 e implementadas en la capa de red: *descubrimiento de topología*, *estimación de la posición de los actores*, *balance de cargas*, *asociación de sensores*, y *enrutamiento*. La primera etapa consiste en recabar la información de las coordenadas de posición de los nodos en la red y centralizarla en el sumidero; para ello requiere la participación de todos los nodos. Enseguida, las etapas dos y tres son desarrolladas de manera centralizada en el sumidero y tienen la función de estimar la posición óptima de los actores, utilizando el algoritmo K-medias; (Llyod, 1957) y de asociar a cada sensor con el actor adecuado, para lograr un balance de cargas en éstos. Por su parte, la etapa cuatro consiste en notificar a cada sensor el actor al que pertenecen, como parte de los grupos formados durante la etapa tres. Esta etapa inicia en el sumidero y posteriormente involucra la participación del resto de los nodos en la red. Por último, la etapa cinco realiza el descubrimiento de rutas desde cada nodo hacia el sumidero, utilizando el algoritmo de (Gallardo López, *et. ál.*, 2007). Resumiendo, las etapas uno, cuatro y cinco requieren la participación de todos los nodos en la red y son implementadas en OPNET. En cambio, las etapas dos y tres se ejecutan en el sumidero y son implementadas en MATLAB. A continuación se describen a detalle cada una de estas etapas.

#### **IV.3.1. Descubrimiento de Topología.**

Como parte de la primera etapa que consiste en el descubrimiento de topología, el sumidero origina la transmisión de un mensaje de activación hacia los actores, para que éstos a su vez, inicien la difusión de mensajes *Hello*. Estos mensajes son propagados por cada actor a través de la red y cada sensor selecciona localmente al mejor actor para asociarse con él, en términos del número de saltos entre el sensor y el actor. Entonces, el sensor selecciona como padre, al nodo del cual

recibió el mensaje *Hello* del actor asociado. Enseguida, el sensor difunde hacia sus nodos vecinos, el mensaje *Hello* del actor seleccionado, mientras descarta los mensajes recibidos de otros actores, reduciendo la inundación de mensajes en la red. Como resultado, se crea un árbol de distribución (MST- *minimum spanning tree*) entre cada actor y los sensores asociados con él. Los árboles son construidos de tal forma que cada nodo sensor pertenece a un árbol y cada árbol tiene un solo actor como raíz. Una vez creados los MST, los nodos fin de rama transmiten su información de localización al actor asociado, a través de su nodo padre, el cual, realiza una fusión de datos integrando su propia información de localización y la de sus nodos hijos. Los paquetes de agregación de datos son entonces retransmitidos al siguiente nodo padre y el proceso es repetido hasta que la localización de todos los miembros del grupo son recibidos por el nodo raíz (actor). Enseguida los actores transmiten la información recolectada al sumidero, el cual almacena los datos y los procesa para realizar la segunda etapa.

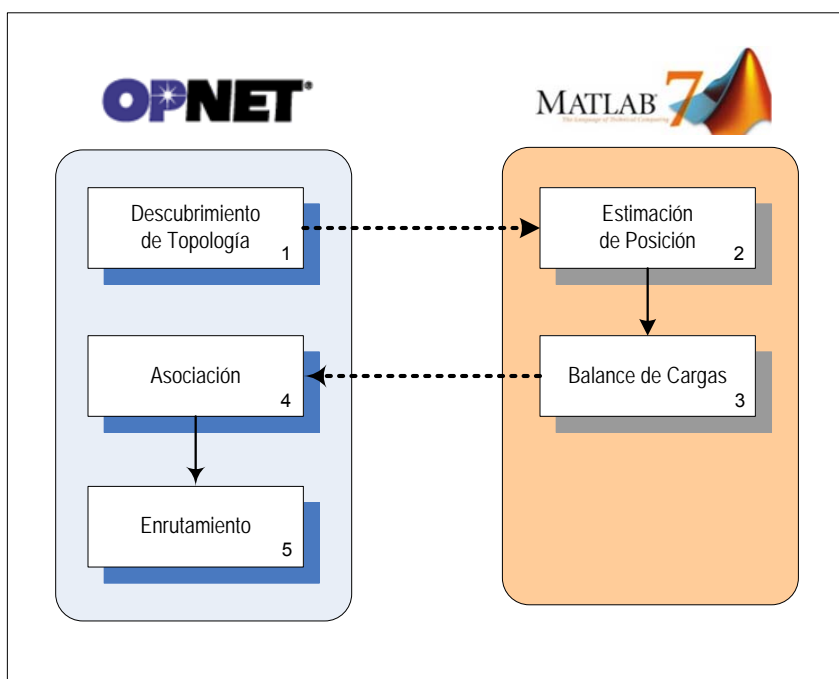


Figura 8. Etapas del Mecanismo de Coordinación propuesto.



### IV.3.2. Estimación de posición de los actores.

La segunda etapa es la responsable de estimar la posición de los actores acorde a la topología de la red, para lograr una distribución más homogénea de los sensores asociados y reducir la distancia del actor raíz con sus sensores miembros. Para ello, el campo es segmentado en  $N_A$  sub-áreas que corresponden al número de actores, utilizando celdas de Voronoi (Okabe *et ál.*, 2000 y Ahuja *et ál.*, 1993). Cada celda está compuesta de un solo actor y un grupo de nodos sensores. Un diagrama de Voronoi es utilizado para segmentar la red en múltiples celdas, las cuales son delimitadas por una recta frontera localizada entre dos actores vecinos (o celdas de Voronoi), como se ilustra en la Figura 9. La ecuación 1 denota la recta frontera entre dos actores vecinos  $A_1$  y  $A_2$  localizados en  $(x_1, y_1)$  y  $(x_2, y_2)$  respectivamente.

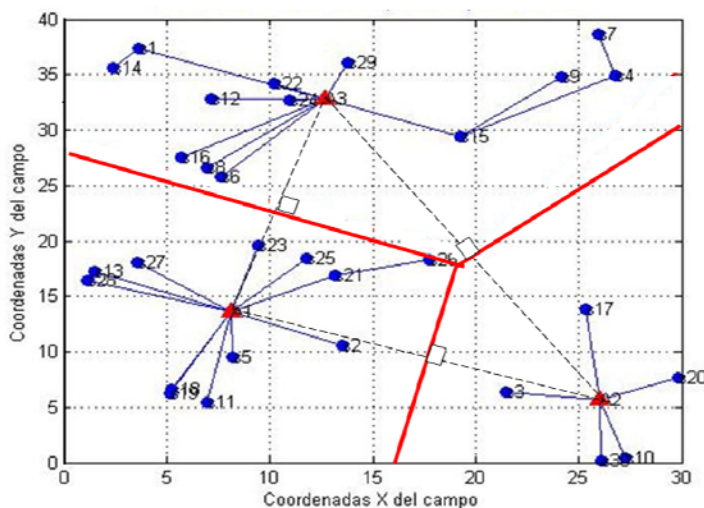


Figura 9. Diagrama de Voronoi de la red

$$Y = \left( \frac{x_1 - x_2}{y_2 - y_1} \right) X + \frac{x_2^2 - x_1^2 + y_2^2 - y_1^2}{2(y_2 - y_1)} \quad (1)$$

En esta etapa se evalúa la posición óptima de los actores, basada en la localización de los nodos sensores dentro de la celda de Voronoi, utilizando el mecanismo de agrupamiento K-medias. Éste es un conocido algoritmo de agrupamiento geométrico, basado en el trabajo de Lloyd (Lloyd, 1957). Dado un conjunto de  $n$  puntos de datos, el algoritmo utiliza la propuesta de búsqueda local para segmentar el conjunto en  $k$  grupos, donde cada grupo representa una celda de Voronoi. En este caso, los valores de  $k$  grupos y  $n$  puntos de datos son seleccionados de acuerdo con los  $N_A$  actores y  $N_S$  sensores respectivamente. Cada punto (nodo sensor) es entonces asignado al actor más cercano y la posición del actor es recalculada como el centro de masas de sus puntos asignados. Este proceso se repite recursivamente hasta alcanzar un punto en el que las nuevas posiciones de los actores están a una distancia  $\Delta d$  menor o igual a la posición anterior, o a un número máximo de ciclos alcanzados, donde la distancia  $\Delta d$  es un parámetro configurable. El algoritmo requiere como parámetros de entrada la posición de sensores y actores de la etapa uno (sección IV.3.1). Al final de esta etapa, se generan como salida los siguientes parámetros: los elementos (sensores) dentro de cada grupo y los centros de masa de las celdas de Voronoi, los cuales representan la posición de cada actor dentro de la celda.

### **IV.3.3. Balance de carga.**

Bajo la premisa de que los sensores generan el mismo tipo de tráfico, se puede estimar que la carga asignada a un actor es comparable con el número de sensores asignados a cada uno de éstos. Por lo tanto, un actor presenta balance de carga cuando su número de sensores miembro es igual a  $N_S/N_A$ , de otra manera el actor presenta desbalance de carga. La tercera etapa tiene como propósito balancear el número de sensores asociados en cada uno de los actores, lo que repercute en la energía consumida por los sensores localizados a un salto de cada

actor, ya que con esta medida es posible también balancear la carga de estos sensores.

Iniciando con el agrupamiento provisto por el despliegue de la etapa 2, el algoritmo en esta etapa considera el número de sensores asociados a cada actor, el cual es almacenado en el arreglo  $SA_j$ , para  $j = 1, 2, \dots, N_A$ ; entonces el índice de balance de carga ( $\ell$ ) es evaluado utilizando  $\ell = \sum_j |SA_j - (N_S/N_A)| / 2N_S$ . Existe una condición de desbalance de carga cuando el índice de balance de carga es diferente de cero. En este caso, es posible disminuir el índice de balance de carga, intercambiando sensores localizados en grupos con exceso de carga a grupos con menos carga. Este proceso se conoce como “Balance Forzado” (BF) y es ejecutado por el sumidero de manera centralizada. El mecanismo BF utiliza la información del agrupamiento provisto por el despliegue de la etapa dos y crea una nueva configuración de agrupamiento en la red.

El proceso de Balance Forzado depende del agrupamiento provisto por el despliegue de la etapa dos, para lo cual se construye una matriz  $M[N_A \times N_S]$ , donde cada renglón representa a un nodo actor y las columnas representan a los nodos sensores. Cada renglón (representa a un nodo actor en una celda de Voronoi) está compuesto por dos secciones: la primera, es formada por los nodos sensores localizados en la misma celda de Voronoi que el nodo actor; la segunda está conformada por el resto de los sensores en la red. Los nodos sensores en la primera sección toman como referencia a la recta frontera más cercana y son ordenados dentro del renglón del más lejano al más cercano a dicha recta frontera. Por su parte, los sensores restantes (sensores fuera de la celda de Voronoi) toman como referencia la posición del actor de la fila en cuestión, y son ordenados en la segunda sección, acomodándolos del más cercano al más lejano a dicho actor. El tamaño de cada sección puede variar de un renglón a otro. El proceso FB inicia con los nodos sensores localizados en la primera sección de la

matriz  $M$ , y construyen un grupo (“*cluster*”) a la vez, hasta que logra el balance de cargas, iniciando con el actor (renglón) con el menor número de nodos asignados a él; si se requiere, un grupo puede incluir sensores localizados en la segunda sección de la matriz  $M$ . Cabe observar que un nodo sensor puede formar parte de un grupo, si éste tiene conectividad con el actor de la celda específica, ya sea de manera directa o a través de múltiples saltos con nodos que ya forman parte del grupo. Una vez que un nodo sensor es asignado a un actor, el sensor llega a ser parte del grupo y es eliminado de la matriz  $M$  (es decir de todos los renglones y columnas), evitando que el sensor sea asignado a más de un actor. Es importante notar que en ciertos escenarios no es posible lograr un balance de cargas perfecto, en este caso, el proceso BF se aproximará lo más posible al balance de cargas teórico y entonces el proceso continuará con el siguiente actor.

Las etapas dos y tres son algoritmos heurísticos; el objetivo de la dos es minimizar la distancia entre el sensor y el cabeza de grupo (actor), mientras que el de la etapa tres es intentar balancear la carga. El efecto combinado de estas dos etapas es que cada nodo sensor se comunicará con uno de sus actores más cercanos, seleccionado en tal forma, que la carga esté balanceada entre los grupos.

Es importante aclarar de nuevo que el objetivo del balance de cargas no es reducir el consumo de energía de los actores (los cuales son dispositivos que poseen una fuente de energía mayor), sino de aquellos nodos sensores que son los más cercanos al actor y que por lo tanto, se encargan de la retransmisión de tráfico generado por los nodos que están más alejados del actor. Al balancear el número de nodos en cada grupo se pretende homogenizar la carga impuesta en estos nodos sensores, extendiendo así el tiempo de vida de la red.

#### **IV.3.4. Asociación de sensores.**

Una vez que los actores son reubicados en la posición estimada por K-medias y que se ha realizado el balance de cargas, es necesario informar a los nodos sensores a qué actor deben asociarse. Esta es la función de la etapa cuatro.

El sumidero transmite a cada actor un mensaje de asociación con la lista de sensores que le fueron asignados en la etapa tres. A su vez, los actores retransmiten el mensaje de asociación a sus nodos vecinos. Los nodos sensores que reciben el mensaje verifican si ellos pertenecen a ese grupo, de ser así, se asocian al actor en cuestión y retransmiten el mensaje a sus nodos vecinos. Si el nodo no pertenece al grupo de la lista recibida, elimina el paquete sin retransmitirlo. Cuando un nodo sensor se asocia a su líder de grupo (actor), envía a éste un mensaje de confirmación de asociación a través del nodo padre de quien recibió el paquete y, activa una bandera de asociación indicando que este nodo ya está asociado. Si un nodo ya asociado recibe otro mensaje de asociación lo destruye sin procesarlo ni retransmitirlo. Los actores al recibir la confirmación de asociación de todos sus nodos miembros, envían al sumidero un aviso notificando que todos sus nodos se han asociado correctamente. Por su parte el sumidero, después de recibir la notificación de asociación de todos los actores, activa una bandera para iniciar la etapa cinco.

#### **IV.3.5. Descubrimiento de rutas al actor asociado.**

La última etapa tiene como objetivo realizar el descubrimiento de un conjunto de rutas disjuntas desde cada nodo sensor hacia su actor asociado, asignando un peso a cada una, proporcional a los cuellos de botella en carga y energía en dichas rutas, con la finalidad de seleccionar la ruta más conveniente durante el reporte de un evento hacia el actor asociado. Este procedimiento emplea un protocolo de enrutamiento por trayectorias múltiples basado en el trabajo realizado

en (Lou *et ál.*, 2005) y mejorado por (Gallardo López, *et ál.*, 2007). Ahora este mismo protocolo es adaptado para operar con varios actores.

El protocolo de enrutamiento descrito en (Gallardo López, *et ál.*, 2007) consiste de cuatro fases, según la Figura 10. En la primera fase, cada actor, desfasado en tiempo y de manera independiente, difunde un mensaje de actualización de rutas, llamado RPRI, cuyo propósito es el descubrimiento de la ruta primaria desde cada nodo a su actor raíz. El formato de este mensaje se muestra en la Figura 11. Los nodos, al recibir el mensaje RPRI por primera vez, verifican si este proviene de su actor asociado, de ser así identifican como nodo padre aquel nodo del que recibió el mensaje y lo retransmite a sus nodos vecinos, de lo contrario destruye el mensaje y lo retransmite a sus nodos vecinos, de lo contrario destruye el mensaje sin retransmitirlo. El mensaje se difunde de nodo a nodo hasta que todos los nodos dentro de un grupo (*“cluster”*) han recibido una copia del mensaje y han identificado a su *padre*, el cual representa el siguiente salto hacia su actor raíz en la ruta primaria.

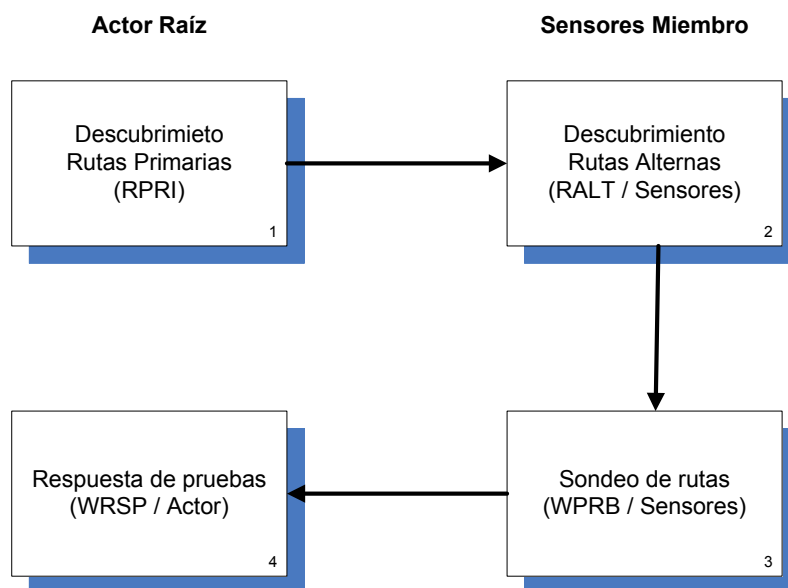
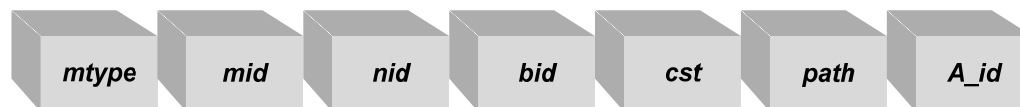


Figura 10. Fases del protocolo de enrutamiento.

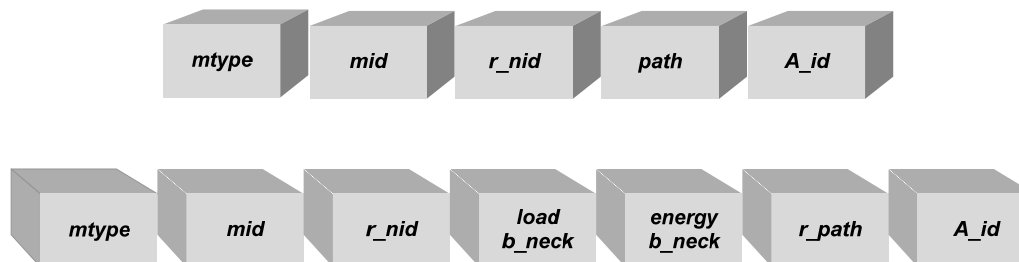
La segunda fase del protocolo de enrutamiento comienza independientemente en cada nodo sensor, y consiste en la transmisión de mensajes del tipo RALT, utilizados para compartir con los vecinos asociados al mismo actor raíz el conjunto de rutas alternas encontradas, ya sea por escuchar el paquete RPRI de un nodo diferente al marcado como padre o por paquetes RALT recibidos de otros vecinos. Cuando la segunda fase termina, los nodos sensores han descubierto todas las rutas disjuntas disponibles con el mínimo costo a su actor raíz. En este caso, el costo está dado por el número de saltos y cantidad de tráfico en cada ruta.



- mtype:** Tipo de mensaje (RPRI o RALT).
- mid:** Número de secuencia del ciclo de actualización de ruta.
- nid:** Identificador del nodo que envía mensaje.
- bid:** Identificador del nodo de inicio de rama de ruta.
- cst:** Costo de la ruta hasta ahora (i.e. número de saltos al sumidero).
- path:** Conjunto de nodos que el mensaje ha visitado hasta ahora.
- A\_id:** Identificador de raíz.

Figura 11. Formato del mensaje de descubrimiento de rutas (RPRI, RALT).

La fase tres inicia después de un período razonable de tiempo durante el cual ningún mensaje RALT es recibido. En esta fase, cada nodo sensor envía un mensaje de prueba WPRB (Figura 12) a través de cada una de las  $N$  rutas descubiertas, incluyendo la ruta primaria y las alternas. Cuando un nodo sensor recibe uno de estos mensajes, incrementa el contador de rutas que pasan a través de él (*num\_routes*) y reenvía el mensaje al siguiente nodo en la ruta a su actor raíz. El mensaje llegará eventualmente al actor raíz, el cual mantendrá una tabla (*probe\_table*) de las rutas contenidas en los mensajes de prueba recibidos.



- mtype:** Tipo de mensaje (RPRI o RALT).
- mid:** Número de secuencia del ciclo de actualización de ruta.
- r\_nid:** Identificador del nodo que ha de recibir el mensaje.
- path:** Ruta desde el nodo que originó el mensaje hasta el sumidero.
- b\_neck:** Cuellos de botella de energía y carga.
- r\_path:** Ruta inversa desde el sumidero hasta el nodo sensor.
- A\_id:** Identificador del actor raíz.

Figura 12. Formato del mensaje de prueba (WPRB) y de respuesta (WRSP).

Finalmente, la fase cuatro es iniciada por el actor raíz después de un tiempo razonablemente largo en el cual ningún mensaje WPRB es recibido. El actor raíz envía un mensaje de respuesta WRSP a través de cada una de las rutas almacenadas en *probe\_table*. Cuando un nodo sensor recibe uno de estos mensajes, lo reenvía al siguiente nodo en la ruta inversa, después ajustar los campos de cuello de botella según los siguientes criterios. Si el valor almacenado en el mensaje como cuello de botella en carga (*load-b-neck*), es menor a la carga esperada en ese nodo (*num\_routes*), se sustituye el valor de *load-b-neck* por el valor de *num\_routes* del nodo, de otra manera, dejará el valor sin alterar. Similarmente, si el valor almacenado en el campo de cuello de botella en energía *energy-b-neck* es mayor que su energía restante *available\_energy*, ajustará *energy-b-neck* a *available\_energy*, de otra manera, dejará el valor sin alterar. El mensaje alcanzará eventualmente al nodo sensor al final de la ruta en reversa. Cuando un nodo sensor se da cuenta de que todos sus mensajes de prueba han sido respondidos o después de que haya expirado un temporizador, cada nodo asignará un peso  $\pi$  a cada una de sus  $N$  rutas de acuerdo con la ecuación 2. Es importante aclarar



que los pesos asignados a las rutas concurrentes se utilizan sólo para elegir la mejor ruta hacia el actor asociado. Es decir, los nodos seleccionan con mayor probabilidad, las rutas con un peso superior.

$$P_i = \frac{\varepsilon_i}{\lambda_i \cdot (h_i)^\beta} \quad \text{para } i=1,2\dots N \quad (2)$$

Donde:

$\varepsilon_i$  = cuello de botella en energía de la ruta  $i$ , recibido en el mensaje de respuesta a prueba de esa ruta (o cero si ninguno es recibido).

$\lambda_i$  = cuello de botella en carga de la ruta  $i$ , recibido en el mensaje de respuesta a prueba de esa ruta (o uno si ninguno es recibido).

$h_i$  = número de saltos de la ruta  $i$ .

$\beta \in (0,1)$  = factor que define el impacto deseado del número de saltos en el peso de las rutas.

El propósito fundamental es balancear la carga y el consumo de energía por nodo (no por enlace), enfocándose solamente en los nodos cuello de botella. Al realizar balanceo por enlace las decisiones que se toman son locales y no representan el comportamiento de la red en forma global, ya que no se toma en cuenta la contribución en carga de los demás nodos de la red.

Una vez configurada la red, inicia la fase de operación normal en la que se dan las transmisiones de datos. La fase de operación normal se mantiene activa hasta que ocurra una reconfiguración programada o la pérdida de algún nodo, provocando el reinicio de las fases dos a la cinco.

#### IV.4. Resumen.

En este capítulo se describe la aportación principal de esta tesis, que consiste en el diseño de un mecanismo de coordinación para WSN. El mecanismo propuesto organiza a los nodos sensores en grupos (*“clusters”*), donde los actores móviles desempeñan el rol de líder de grupo (*“cluster-head”*). La propuesta considera la movilidad de los actores e implementa un mecanismo para modificar dinámicamente la localización geográfica de los actores, mientras se intenta reducir la carga en términos del número de sensores dentro de cada grupo, con el propósito de extender el tiempo de vida de la red.

El mecanismo propuesto consta de cinco etapas, las cuales son implementadas en la capa de red, y que consisten en: *descubrimiento de topología, estimación de la posición de los actores, balance de cargas, asociación de sensores, y enrutamiento*. La primera etapa se utiliza para recabar la información de las coordenadas de posición de los nodos en la red y centralizarla en el sumidero, para este propósito se requiere de la participación de todos los nodos. Enseguida, las etapas dos y tres se ejecutan de manera centralizada en el sumidero y tienen la función de estimar la posición óptima de los actores, utilizando el algoritmo K-medias, y de asociar a cada sensor con el actor adecuado para lograr un balance de cargas en éstos, respectivamente. Por su parte, la etapa cuatro consiste en notificar a cada sensor cuál es el actor al que pertenecen, como resultado de los grupos formados durante la etapa tres. Esta etapa inicia en el sumidero y posteriormente involucra la participación del resto de los nodos en la red. Por último, la etapa cinco realiza el descubrimiento de rutas desde cada nodo hacia el sumidero, utilizando el algoritmo de (Gallardo López *et ál.*, 2007). Resumiendo, las etapas uno, cuatro y cinco requieren la participación de todos los nodos en la red y son implementadas en OPNET. En cambio, las etapas dos y tres se ejecutan en el sumidero y son implementadas en MATLAB.

## Capítulo V

---

### Implementación del Mecanismo de Coordinación propuesto

---

#### V.1. Introducción.

En el mundo actual, los proyectos complejos y de gran escala requieren estudios previos a su construcción, tales estudios se realizan utilizando modelos que representan el sistema a desarrollar, con el fin de obtener conclusiones aplicables al sistema real. Tal es el caso del objeto de estudio de este trabajo, el diseño de un mecanismo de coordinación, que para ser evaluado requiere implementarse sobre una red WSN, la cual representa al sistema en conjunto con los protocolos utilizados. Este tipo de sistemas son complejos, costosos y difíciles de implementar físicamente en el campo real, es por ello que se emplean modelos de simulación como una estrategia para analizar y validar la propuesta.

En este capítulo se presenta el modelo de simulación del mecanismo de coordinación propuesto. El modelo es implementado en el simulador de redes OPNET y en MATLAB, por lo que fue necesario desarrollar una interfaz para la comunicación entre los algoritmos implementados en estas herramientas. El modelo completo es analizado a detalle desde los puntos de vista estructural, de comunicación y de programación.

## V.2. Análisis de Tareas.

La tarea principal de esta tesis es el desarrollo de un mecanismo de coordinación innovador para redes de tipo WSN, donde la mayor parte del trabajo está implementado en la capa de red, en la cual se desarrollan las etapas del mecanismo propuesto definidas en el capítulo IV, sección IV.3. En las capas inferiores se utilizan protocolos existentes de capa Física y capa MAC, incluidos en el estándar IEEE 802.15.4. (IEEE 802.15.4, 2010 y Zigbee, 2010) Las capas MAC y Física se simularon usando versiones modificadas del modelo disponible en Open-ZB (Koubâa, *et ál.*, 2007), el cual es una implementación de código abierto (open source) del estándar IEEE 802.15.4/ZigBee, con modelos de simulación para OPNET y TinyOS. El modelo propuesto por Open-ZB utiliza CSMA/CA ranurado y beacon habilitado bajo una topología estrella, sin embargo, se seleccionó modelar la red con CSMA/CA no ranurado sin beacon habilitado, debido a que éste permite la comunicación en modo ad hoc entre nodos sensores y facilita la implementación, al no utilizar la estructura de supertrama. Por otro lado, el modo sin beacon habilitado, permite crear redes con topología malla o árbol, obteniendo redes más densas.

Con la finalidad de analizar el desempeño del mecanismo propuesto, éste debe ser modelado en un ambiente de simulación. Varios de los simuladores (Sing, *et ál.*, 2008) gratuitos disponibles no son precisos y no pueden proveer un análisis flexible del modelo de simulación. Al inicio del modelado de este trabajo, el único modelo de simulación disponible de la implementación parcial del estándar IEEE 802.15.4 fue provisto por Open-ZB (Koubâa, *et ál.*, 2007), cuyo modelo (V1.0) es creado con el simulador comercial OPNET (Opnet, 2007), razón por la cual se seleccionó este ambiente de simulación para el desarrollo de la propuesta. Este simulador es presentado con mayor detalle en la sección V.3.

Para evaluar el desempeño del modelo implementado, se consideran como estadísticas principales el consumo de energía, el retardo extremo-extremo de los paquetes y la tasa de entrega de paquetes de datos. Finalmente, para validar la propuesta se comparan los resultados de simulación del modelo propuesto contra un escenario que excluye las fases de estimación de posición y balance de carga, que corresponden a las fases dos y tres del mecanismo propuesto descritas en las secciones IV.3.2 y IV.3.3.

### **V.3. Ambiente de simulación en OPNET.**

OPNET es una herramienta de simulación de redes manejada por eventos (Opnet, 2007), que permite una fácil implementación de todos los elementos del modelo. En la Figura 13 se muestra un ejemplo del ambiente de simulación en OPNET, que consta de editores de proyecto, nodo, proceso y código. El modelo de proyectos permite desplegar y visualizar los elementos de la red, cuyos parámetros pueden configurarse fácilmente. El modelo de nodo especifica los bloques principales y los parámetros de un nodo y provee una interfaz a un elemento de red. Por su parte, el modelo de procesos define los estados y la transición entre éstos, de los elementos del modelo de nodo. Éste abstrae el comportamiento de los elementos de la red. Además de estos modelos principales, OPNET provee un generador de formato de paquetes que permite construir cualquier paquete conformado por varios campos de longitud variable y con ello seguir las especificaciones exactas de un protocolo.

Para modelar el mecanismo de coordinación propuesto se utilizó OPNET versión 14.0, además de las licencias de módulos inalámbricos y herramientas de movilidad. Este trabajo incluye algunas partes del modelo WPAN IEEE 802.15.4 disponible en (Koubâa, *et ál.*, 2007).

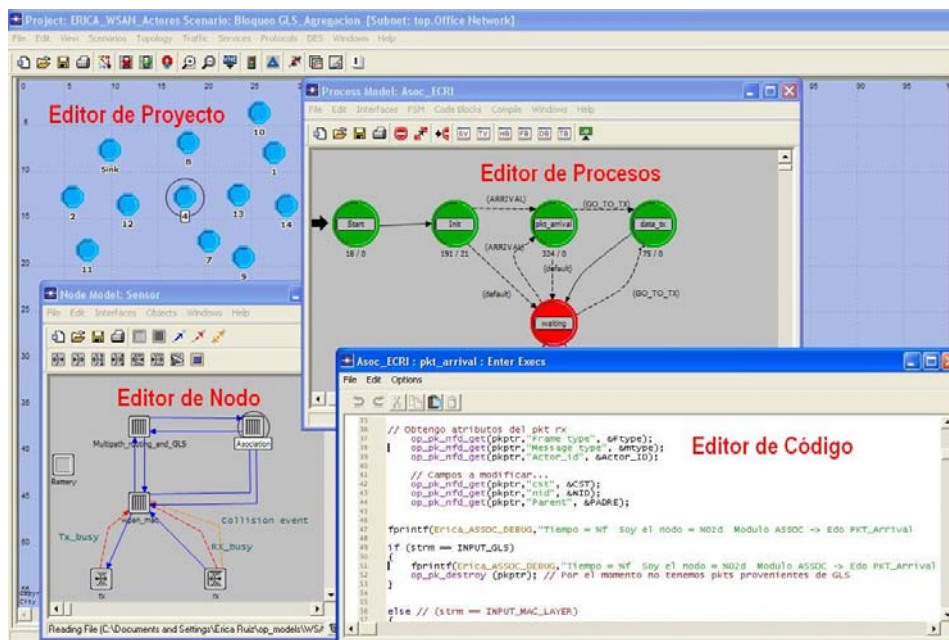


Figura 13. Ambiente de simulación OPNET.

#### V.4. Estructura del modelo de simulación.

El modelo consta de dos tipos de nodos inalámbricos: actores móviles y nodos sensores fijos. Los primeros se encuentran en menor cantidad, sin embargo poseen capacidades de comunicación, potencia y procesamiento superiores a los nodos sensores. Ambos utilizan el estándar IEEE 802.15.4 en modo sin beacon habilitado con CSMA/CA. Se considera que los nodos actores poseen dos interfaces de radio, una para la comunicación con nodos sensores y la segunda para la comunicación entre actores.

Los nodos sensores y actores poseen una pila de protocolos para la comunicación con otros nodos, la cual comprende desde la capa física a la capa de aplicación. Estas capas son implementadas como procesos separados para los diferentes módulos. Este modelo implementa las capas Física, MAC, Red y Aplicación tal como muestra en la Figura 14. Específicamente en la capa de red se implementan

las cinco etapas del mecanismo propuesto descritas en la sección IV.3, donde el módulo de *Association* corresponde a las etapas de descubrimiento de topología y asociación de sensores (secciones IV.3.1 y IV.3.4 respectivamente), y el módulo de *Multipath\_routing\_and\_GLS* corresponde a la etapa cinco de la propuesta, descrita en la sección IV.3.5.

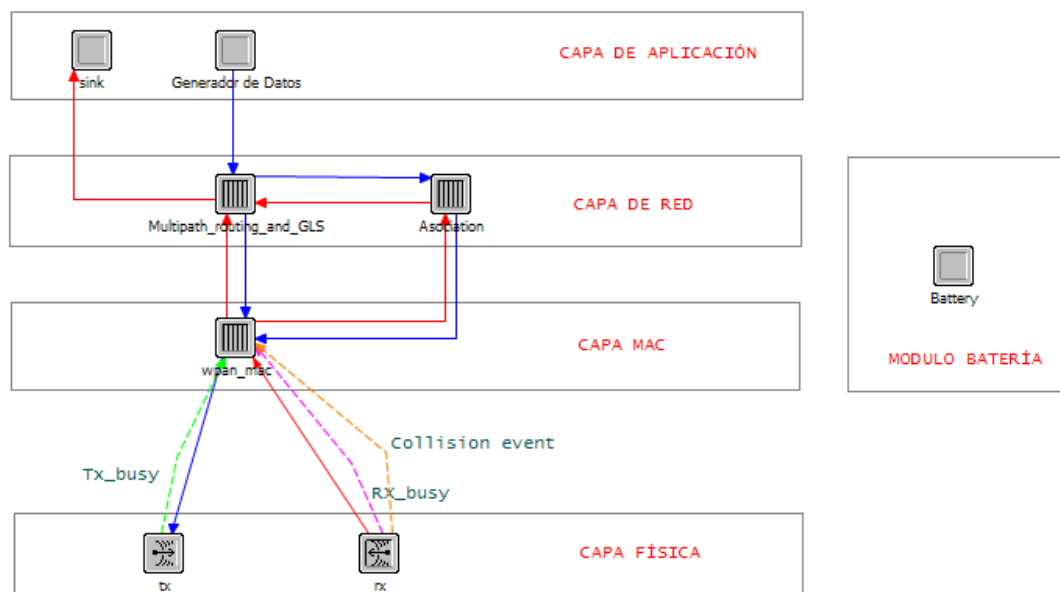


Figura 14. Modelo de Nodo.

La capa Física incluye un transmisor y un receptor que operan en la banda de frecuencia de 2.4GHz, con 2MHz de ancho de banda y modulación QPSK. Por su parte, la capa MAC contiene CSMA/CA no ranurado en modo beacon no habilitado y, es responsable de la transmisión y retransmisión de paquetes, así como de evitar colisiones. A nivel de capa de red se incluye un módulo llamado *Asociación*, responsable del descubrimiento de topología (etapa uno descrita en la sección IV.3.1), y de compartir con MATLAB la información de posición de los nodos, para el desarrollo de las etapas de estimación de posición y balance de cargas (etapas

dos y tres descritas en la sección IV.3.2, y IV.3.3 respectivamente). Enseguida, como resultado de las etapas dos y tres, MATLAB provee a OPNET, a través del módulo de *Asociación*, la posición estimada de los actores y la información de a qué actor se encuentra asociado cada uno de los sensores. Con esta información el módulo de *Asociación* lleva a cabo la etapa cuatro (Asociación de sensores) y activa una bandera para que un segundo módulo, llamado *Multipath\_Routing* ubicado en la capa de red, inicie el descubrimiento de rutas, correspondiente a la etapa cinco del mecanismo propuesto. Finalmente, cada nodo reporta la ocurrencia de un evento hacia su actor asociado, a través de la ruta principal descubierta en la etapa cinco, que como ya se mencionó en la sección IV.3.5., las rutas con mayor peso son seleccionadas con mayor probabilidad como rutas principales, quedando sin utilizar el resto de rutas alternas.

El módulo *Multipath\_Routing* es una versión modificada del módulo desarrollado e implementado por (Gallardo López, *et ál.*, 2007), el cual originalmente opera bajo la plataforma del estándar IEEE 802.11. Para integrar este módulo al mecanismo de coordinación, fue necesario realizar algunos cambios que permitieran trabajar con actores móviles y operar bajo la plataforma IEEE 802.15.4.

En cuanto a la capa de aplicación, el modelo de simulación incluye un generador de datos, para tramas sin acuse de recibo y un módulo sumidero que calcula las estadísticas de los nodos. Adicionalmente, el modelo de nodo cuenta con el módulo *Battery* para el cálculo de la energía residual del nodo.

A continuación se enlistan las actividades más importantes que fueron realizadas como parte del modelo de simulación:

- Modificación del modelo IEEE 802.15.4 disponible en (Koubâa, *et ál.*, 2007),
- Procedimientos de transmisión y acuse de recibo ACK.



- Modificación al pipeline *dra\_clousure.c* para definir rango de cobertura de los nodos.
- Procedimientos de despliegue aleatorio de nodos.
- Procedimientos de movilidad en los nodos y actualización de posición.
- Procedimientos para el manejo de arreglos de listas.
- Implementación del módulo de descubrimiento de Topología.
- Procedimientos de agregación de datos.
- Procedimientos de agrupamiento de nodos.
- Desarrollo de interfaz para la comunicación entre OPNET y MATLAB.
- Implementación del módulo de *Asociación* de sensores.
- Procedimientos para depurar los modelos.
- Modificación del modelo *Multipath\_Routing* para operar con varios actores móviles.
- Modelo de procesos de la capa de aplicación con generador de paquetes y sumidero.
- Implementación del módulo *Battery* para supervisar el consumo de energía.
- Manejo de ICIs (Inter-Control Interfaces) para el intercambio de información entre módulos.
- Colección de estadísticas.
- Configuración de parámetros del módulo de nodo.
- Configuración del escenario de simulación.

## **V.5. Análisis del modelo de programación.**

Un aspecto muy importante de este trabajo es la implementación de un modelo de simulación de una red tipo WSN, que consiste de nodos sensores inalámbricos utilizando el estándar IEEE 802.15.4 y la capa de red que realiza las funciones del mecanismo de coordinación. Enseguida se presentan y se analizan por separado los modelos de programación.

### V.5.1. Modelo de nodo.

El modelo de nodo es presentado en la Figura 14. Esta estructura es la misma para ambos nodos, sensores y actores, los cuales se diferencian por transmitir en diferentes bandas de frecuencia y niveles de potencia. Los actores se comunican entre sí de manera directa, en cambio, la comunicación entre actores y sensores es a través de multi-saltos. El modelo de nodo representa la pila de protocolos contenida en diferentes bloques.

Si el proceso es ejecutado en un nodo actor se activa una bandera llamada *Soy\_Actor = 1* que permite diferenciar las actividades realizadas por sensores y actores a lo largo de toda la simulación. Los nodos actores son identificados por utilizar las direcciones MAC más bajas, de 0 a  $N_A - 1$  donde  $N_A$  es el número de actores en la red. En este trabajo el sumidero es uno de los actores que existen en la red, el cual se identifica por tener la dirección MAC cero y realizar tareas específicas como la estimación de posición y el balance de cargas entre otras. Los nodos sensores y actores son configurados como nodos móviles, para fines de despliegue aleatorio, sin embargo, los actores son los únicos que actualizan su posición, después del procedimiento de despliegue, acorde a la información de la etapa de estimación de posición proporcionada por MATLAB.

El procedimiento de despliegue aleatorio consiste en modificar la topología de la red para lanzar una simulación nueva de forma automática. Para ello, los nodos sensores y actores se consideran móviles y se generan números aleatorios, correspondientes a las posiciones de los nodos dentro de los límites del área de la red.

En la capa Física, el receptor y el transmisor de señales de radio se encuentran separados y descritos por diferentes módulos. La transmisión y recepción de datos se realiza en múltiples estados de diferentes funciones. Los parámetros BER (*Bit*

*Error Rate*), SNR (*Signal to Noise Ratio*), etc., son calculados para cada paquete recibido y controlados por el modelo de radio. Los paquetes son intercambiados entre las capas Física y MAC a través de canales de datos (líneas solidas). Por su parte, las estadísticas físicas (líneas punteadas) son utilizadas para indicar la condición del canal a las capas superiores. Es decir, eventos tales como, receptor ocupado y colisiones son indicados por el módulo receptor.

La configuración de transmisor y receptor se muestra en la Figura 15, cuyos parámetros son seleccionados acorde a las características de la capa física de IEEE 802.15.4. Otro aspecto que es necesario definir son los formatos de paquete soportados por la capa física, los cuales son descritos en secciones posteriores.

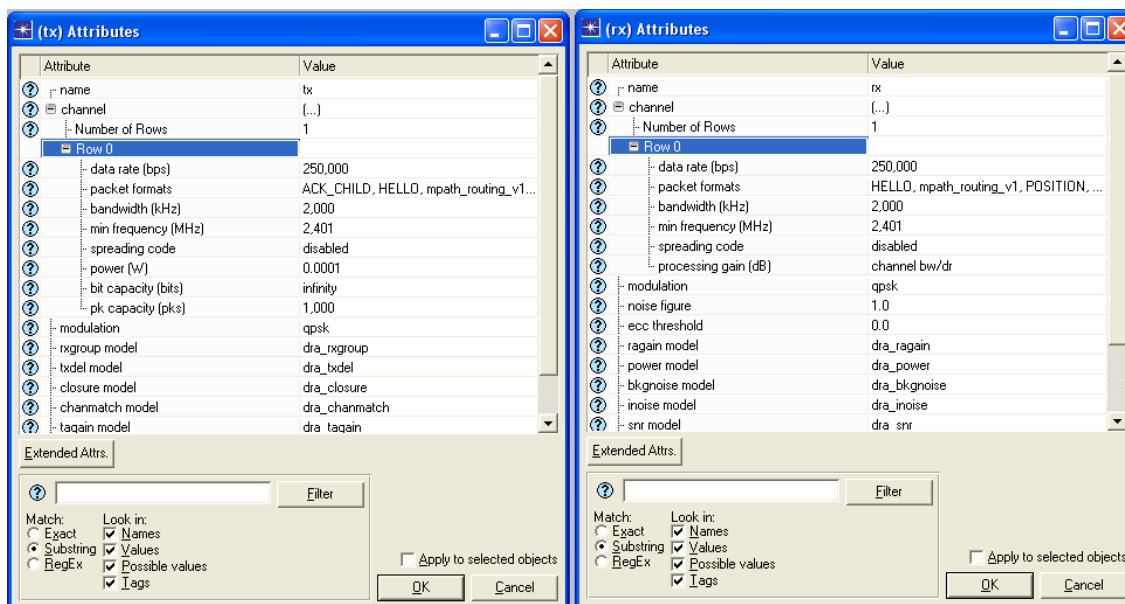


Figura 15. Configuración de los módulos Tx y Rx.

La siguiente capa es la de control de acceso al medio (*wpan\_mac*). Este módulo incluye el modelo de procesos del procedimiento MAC sin beacon habilitado, con el protocolo de acceso CSMA/CA no ranurado, el cual permite la comunicación en

modo ad hoc entre nodos. La capa MAC es la interfaz entre la capa física y la capa de red y tiene las siguientes funciones:

- Proveer funciones de control para la capa física.
- Filtrado y manejo de paquetes.
- Control de acceso al medio (CSMA/CA no ranurado).
- Transmisión y retransmisión de paquetes.
- Informar a la capa de red acerca de los paquetes transmitidos y recibidos.
- Informar al módulo de batería acerca de los paquetes transmitidos y recibidos, para que realice los cálculos de consumo de energía.

Por su parte, la capa de red implementa en el modelo de procesos las etapas del mecanismo de coordinación descritas en el capítulo IV, sección IV.3, en el sentido de que encapsula los datos provenientes de la capa de aplicación y provee la información de los paquetes recibidos al módulo *Sink*. El modelo de nodo provee la interfaz que controla los parámetros iniciales de este modelo de procesos y la relación con otros módulos en el modelo de nodos. Finalmente, la estructura de programación interna de esta capa, es diferente para nodos sensores y actores. Las principales funciones de esta capa son:

- Descubrimiento de topología.
- Configuración de tablas de nodos vecinos.
- Procesamiento de información de movilidad.
- Asociación de sensores con actor raíz.
- Desarrollo de interfaz de comunicación entre OPNET y MATLAB
- Fusión de datos.
- Descubrimiento de rutas.

En la capa de aplicación, el generador de datos (data) genera los paquetes de acuse de recibo ACK requeridos, e informa al módulo *Sink* cada vez que un nodo

recibe un paquete de datos para el cálculo de estadísticas. Por su parte, los parámetros iniciales son controlados desde el modelo de nodos.

Como elemento adicional a la estructura del modelo de nodo se encuentra el módulo *Battery*, el cual soporta los parámetros especificados para los dispositivos MICAz (dispositivo mote desarrollado con Tecnología Crossbow) y, cuyo propósito es el cálculo del consumo de energía de los nodos. A través de este nodo, es posible configurar la cantidad de energía inicial, con la finalidad de evaluar el tiempo de vida de la red y la energía consumida durante el tiempo de simulación.

### **V.5.2. Formato de paquetes.**

El formato de paquetes especifica los campos presentes en cada tipo de paquete transmitido. Este modelo soporta diferentes formatos de paquete en cada capa, los cuales se comparten entre capas a través de procedimientos de encapsulación y desencapsulación.

En OPNET, los formatos de paquetes de datos son creados con la ayuda del editor de paquetes, en el que se crea el paquete desde los campos de éste, los cuales pueden ser definidos como nombre del campo, campo indexado sin nombre o vector de datos. Los datos del paquete pueden ser específicos (enteros, números de punto flotante de doble precisión), estructuras, o pueden ser heredados, éstos últimos se emplean con frecuencia para encapsular la carga útil.

Los formatos de paquetes para la capa MAC y la capa física son los mismos. En este trabajo, sólo se emplean dos formatos de paquete, el formato de paquete MAC con direccionamiento corto de 16 bits mostrado en Figura 16 y, el formato de paquete de acuse de recibo ACK presentado en la Figura 17. Esos formatos de paquete son definidos en el estándar IEEE 802.15.4 y están disponibles en

(Koubâa, *et ál.*, 2007). Sin embargo, no todos los campos son aprovechados por el protocolo MAC modificado.

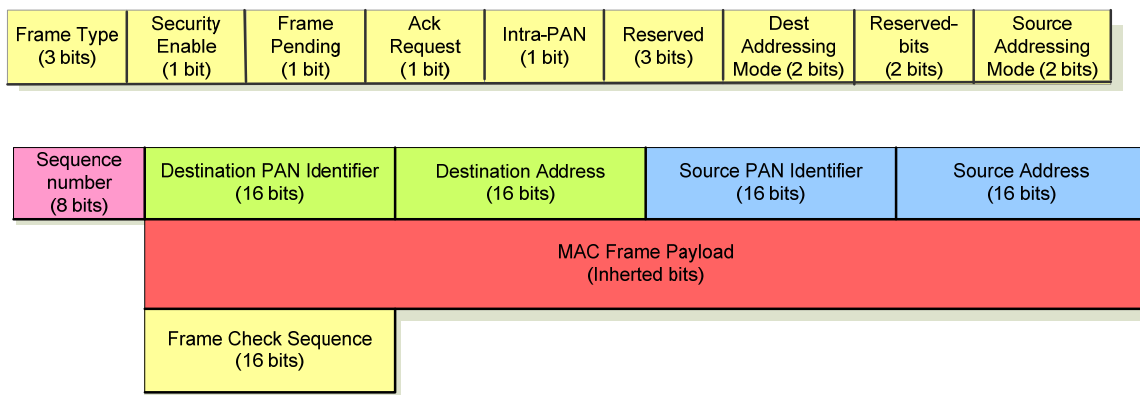


Figura 16. Formato de paquete MAC (*wpan\_mac\_pkt\_format*).

En el formato del paquete MAC sólo se usan los siguientes campos:

- *Frame Type*, define el tipo de paquete. Cuando es *1* indica que se trata de un paquete de datos, y en *0* indica que es un paquete de *ACK*.
- *Ack Request*, indica si se solicita acuse (*ACK*). Un *1* indica que sí es solicitado, y un *0*, que no se solicita.
- *Sequence Number*, muestra el número de secuencia del paquete. Este número es escogido aleatoriamente por la capa MAC para el primer paquete, sin embargo, la transmisión de los paquetes subsecuentes sólo incrementan en uno el número de secuencia.
- *Destination Address*, identifica el nodo receptor del paquete. Es una dirección MAC de 16 bits, que es única para cada nodo.
- *Source Address*, identifica la dirección MAC origen del paquete transmitido. El formato es el mismo que el campo *DestinationAddress*.

- *MAC Frame Payload*, es el paquete heredado de la capa de red. Es encapsulado en MAC. La longitud de este campo depende del tamaño de la carga útil.

Si el campo *Ack Request* es puesto en 1 en el paquete transmitido, se debe enviar al nodo fuente un paquete de acuse de recibo *ACK*, como el mostrado en Figura 17.

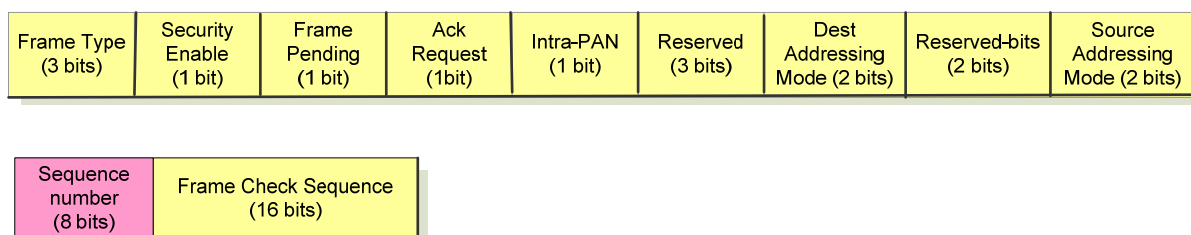


Figura 17. Formato de paquete ACK (*wpan\_ack\_frame\_pkt\_format*).

Los siguientes campos son utilizados aquí:

- *Frame Type*, define el tipo de paquete. Se usa el valor 2 para un paquete *ACK*.
- *Sequence Number*, indica a que paquete se refiere el acuse.

Para la capa de red, los formatos de paquete utilizados en el módulo de *Multipath\_Routing* se describieron en la sección IV.3.5, en esta sección se describen los formatos de paquetes empleados en el módulo “*Association*”. Este módulo genera tres tipos de paquetes: *HELLO*, *POSITION* y *CLUSTERING*, los cuales se muestran en la Figura 18. El mensaje *HELLO* es generado en los nodos actores y difundidos hacia los nodos sensores para que éstos determinen en base

al número de saltos cuál es su actor más cercano. Enseguida, los nodos sensores transmiten su posición hacia el actor identificado como el más cercano, a través de su nodo padre, utilizando el paquete *POSITION*. Finalmente, la información proporcionada por MATLAB con la lista de asociación de los nodos sensores, después de las etapas de estimación de posición y balance de cargas, es transmitida del sumidero a los nodos actores, y posteriormente de cada uno de los nodos actores hacia sus nodos miembros, utilizando el formato de paquete *CLUSTERING*.

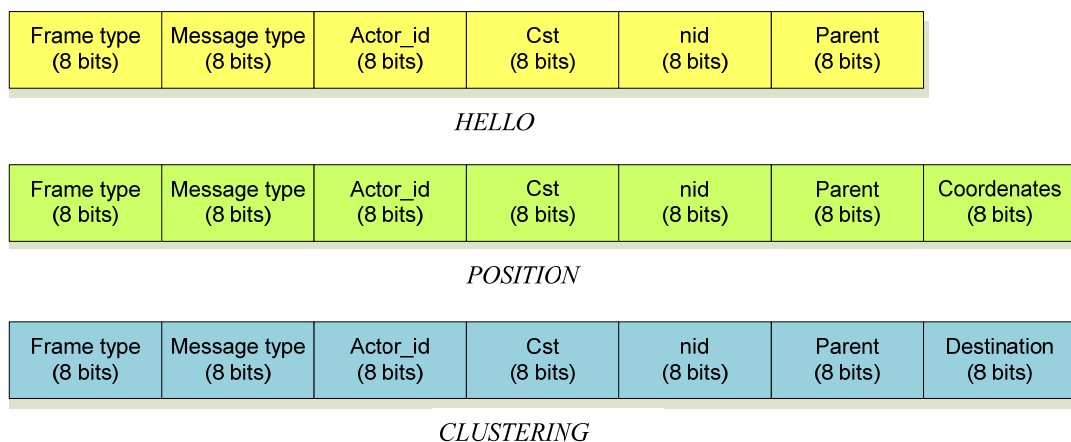


Figura 18. Formatos de paquete utilizados en el módulo de Asociación.

Enseguida se definen los campos utilizados para cada formato de paquete.

- *Frame type*, define el formato del paquete de red. El valor 1 define que es una trama del módulo de Asociación y un 0 que proviene de la capa MAC.
- *Message type*, identifica el tipo de mensaje el cual puede ser cualquier de los siguientes tipos: *HELLO*, *POSITION*, *ACK\_CHILD* y *CLUSTERING*.
- *Actor\_id*, para el formato de paquete *HELLO*, este campo identifica al actor que generó el paquete. En el formato de paquete *POSITION* representa al



actor más cercano al nodo que generó el paquete de posición. Por último para el formato de paquete *CLUSTERING* señala al actor que generó dicho paquete.

- *cost*, muestra la longitud de la ruta, medida en número de saltos, desde el nodo que genera el paquete hacia el actor raíz.
- *nid*, identifica el propietario del paquete generado. Este campo muestra la fuente del dato generado si el paquete es enrutado sobre múltiples saltos.
- *Parent*, señala al siguiente nodo en la ruta en reversa hacia el actor raíz.
- *Coordinates*, indica la posición del nodo origen o una lista de las posiciones de los nodos fusionados.
- *Destination*, identifica el nodo receptor del paquete. Es una dirección MAC de 8 bits, que es única para cada nodo.

### **V.5.3. Módulo de radio.**

En OPNET el modelo de radio tiene una estructura compleja de un bloque para el transceptor denominado “pipeline”, que incluye 14 pasos intermedios, como: retardo, cobertura de enlace, asociación de canal, ganancia ruido, interferencia, errores de cálculo, SNR y corrección de error, entre otros. Particularmente, el bloque cobertura de enlace (“pipeline link closure”), está encargado de definir si un enlace entre dos nodos es válido o no en base a alguno de sus tres modos de operación:

- Sin ningún obstáculo.
- Espacio libre con línea de vista incluyendo modelo de curvatura de la tierra.
- Modelado de terreno.

OPNET configura por defecto este “pipeline” para operar en el primer modo, el cual le permite a todos los nodos estar al alcance uno del otro. Sin embargo, en este trabajo, el valor por omisión fue modificado para darle a cada nodo un radio de cobertura definido, permitiendo la simulación de redes con múltiples saltos.

Se utilizó el modelo de propagación de espacio libre, el cual responde a un modelo ideal, análogo a las condiciones de propagación en el vacío. Es decir, se considera que los nodos podrán comunicarse entre sí, siempre y cuando estén dentro del radio de cobertura establecido, sin importar si existen obstáculos que impidan la propagación correcta de la señal. Hay que reconocer que en el entorno terrestre muy pocas situaciones se ajustan a este modelo; la presencia de la tierra, la atmósfera y la ionósfera alteran en la mayoría de los casos reales las condiciones de propagación. Sin embargo, al utilizar este modelo, se pretende simplificar el modelo de simulación, enfocándose en la parte medular del trabajo que es la estimación de posición y balance de cargas de los actores.

En el mismo sentido, se define un Rango de Transmisión Crítico (RTC) (Santi *et al.*, 2005), que promueve que los nodos desplegados en un área dada, constituyan con alta probabilidad una red conectada. Específicamente se utilizó un RTC de 10 metros, el cual se configuró modificando el “pipeline” *dra\_closure* de OPNET como se explicó previamente. Aplicando la teoría de RTC y conociendo el área de despliegue de la red y el radio de cobertura, es posible conocer el número de nodos que se requieren desplegar de manera aleatoria, con una distribución uniforme, para tener conectividad con alta probabilidad. Es importante aclarar, que el rango de transmisión crítico no se utiliza para determinar la mínima potencia de transmisión de los nodos con el fin de ahorrar energía; de hecho, la propuesta no considera la aplicación de técnicas de control de potencia, como ya se mencionó.

#### V.5.4. Módulo de Batería.

El consumo de potencia es una de las métricas más importantes de las redes de sensores, razón por la cual se incluye en el modelo un módulo de batería, utilizado para recolectar las estadísticas del consumo de energía de la WSN. Este módulo está disponible en el modelo Open-Zb (Koubâa, *et ál.*, 2006) y utiliza un modelo de procesos muy sencillo, mostrado en la Figura 19, que consta de dos estados: *init* para la inicialización de variables y el estado de *dissipación de potencia*, en el que se calcula la cantidad de energía utilizada, acorde a la longitud del paquete y la dirección del flujo de datos. Para proveer la información acerca de los paquetes transmitidos y recibidos por la capa MAC se emplea una interfaz ICI.

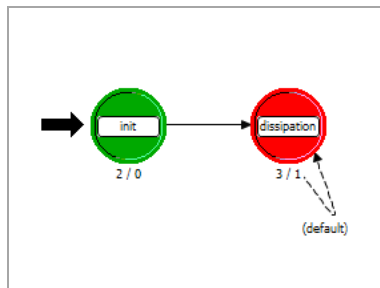


Figura 19. Modelo de Procesos del módulo Battery.

En el módulo *Battery*, es posible modificar los parámetros de la cantidad de energía inicial en Joules del nodo, ya sea definiendo el valor numérico de ésta o eligiendo la energía inicial correspondiente a la capacidad de las baterías comerciales que puede usar el nodo, tal como se muestra en la Figura 20. Así mismo, permite establecer los requerimientos del consumo de energía para los modos de recepción, transmisión y estado ocioso (*“idle”*), aunque en este modelo sólo se emplean los modos de recepción y transmisión, debido a que en la capa MAC no se utiliza la estructura de supertrama, lo que provoca que el nodo se encuentre siempre activo.

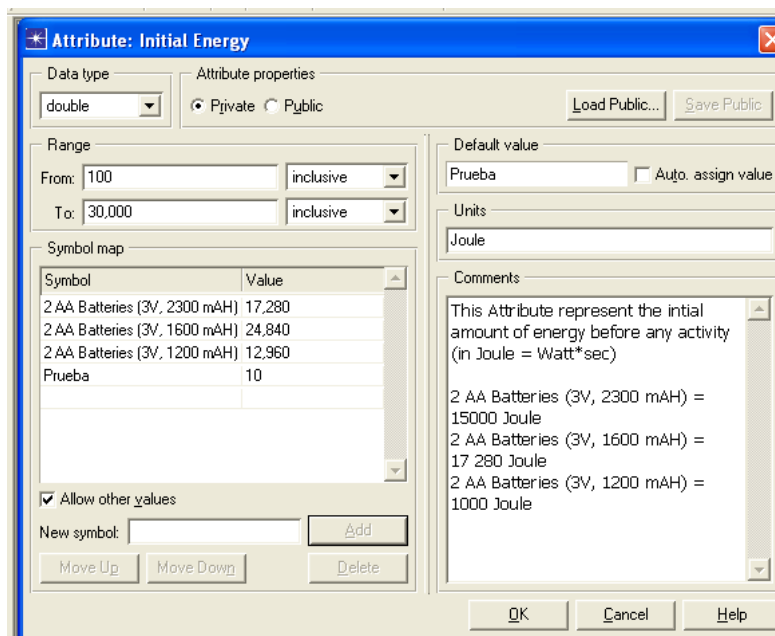


Figura 20. Parámetros de energía inicial del nodo.

La cantidad inicial de energía es definida en Joules, acorde a la capacidad estándar de una pila alcalina o batería recargable, lo que equivale a aproximadamente 10,000 Joules para baterías tradicionales (Verdone, *et ál.*, 2008). Sin embargo, en este caso se establece una energía inicial de 10 Joules, con la finalidad de reducir el tiempo de simulación necesario para analizar el impacto del mecanismo propuesto en el tiempo de vida de la red, donde éste, se define como el período durante el cual la red opera bajo los requerimientos de desempeño especificados. La Figura 21 muestra los parámetros de configuración del módulo *Battery*.

En cuanto a los parámetros del consumo de potencia, éstos son seleccionados de acuerdo con las especificaciones de los dispositivos MICAz, los cuales se presentan en la Tabla V.

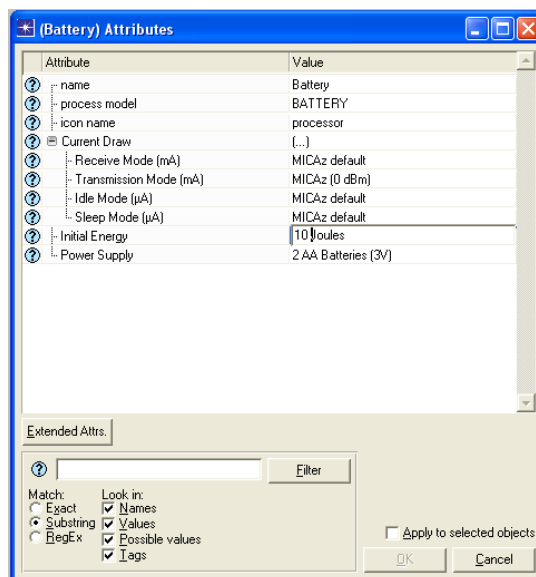


Figura 21. Parámetros de configuración del módulo Battery.

Tabla V. Parámetros del consumo de potencia.

	Corriente consumida	Watts consumidos
Modo de Recepción	19.7mA	59.1 mW
Modo de Transmisión	17.4mA	52.2 mW
Estado Idle	20µA	60µW
Estado Sleep	1µA	3µW

### V.5.5. Módulo de capa MAC.

El modelo de procesos de la capa MAC mostrado en la Figura 22, incluye como elemento principal, la implementación del algoritmo CSMA/CA. Este algoritmo es responsable de la transmisión y retransmisión de paquetes provenientes de la capa de red, los cuales son colocados en una cola FIFO calendarizada. Mientras la cola no esté vacía, la bandera *PACKET\_READY\_TO\_SEND* permite cambiar del estado *Idle* al estado *Init\_backoff* para la inicialización del temporizador de retracción. El nodo espera un período de tiempo aleatorio antes de que ésta pueda

iniciar el procedimiento *CCA* (Clear Channel Assessment). Cuando el temporizador de retracción expira, inicia el procedimiento *CCA*, donde el canal es sentido para determinar cuando se encuentra desocupado, a través de la estadística *rx\_busy* en el modelo de nodo. Si durante el procedimiento de *CCA*, el canal se encuentra ocupado, se repite el procedimiento de retracción, regresando al estado de *Backoff\_timer*, donde se actualiza el temporizador seleccionando un nuevo período aleatorio.

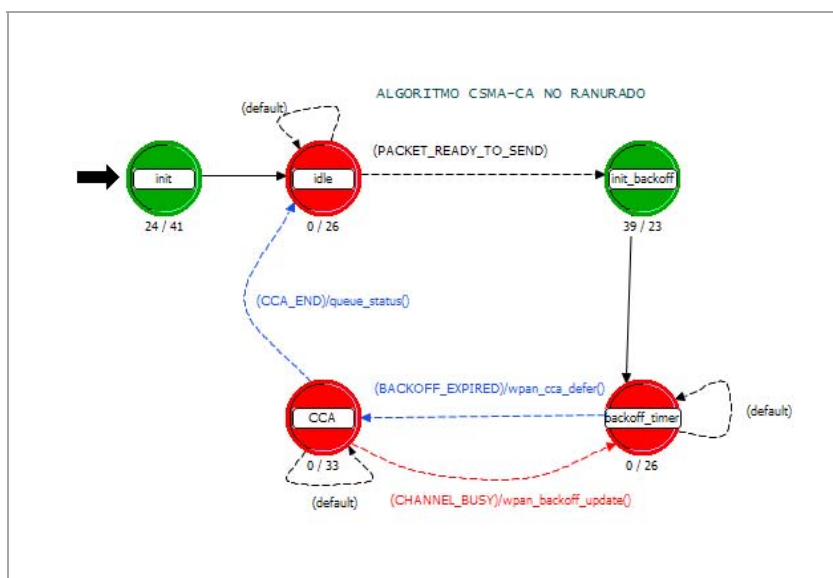


Figura 22. Modelo de procesos de capa MAC IEEE 802.15.4.

La bandera *CCA\_END* se activa en los siguientes casos:

- Falla de una transmisión.
- Éxito al transmitir un paquete sin reconocimiento.
- Recepción exitosa de un paquete ACK.
- Espera fallida de un paquete ACK.
- El número de períodos de retracción alcanza el número máximo de reintentos de retracción.

Cuando ocurre una falla en la transmisión o recepción de un ACK, el paquete es desechado, es decir es removido de la cola de espera en la capa MAC. Una notificación de esta falla es enviada a la capa de red a través de una interfaz ICI. Si la transmisión del ACK es exitosa, el valor de ACK (1) se notifica a la capa de red. Cuando el paquete es recibido de la capa Física, la capa MAC inicia el filtrado de los paquetes. Si la dirección destino es igual a la dirección MAC del nodo receptor o si éste tiene una dirección broadcast ( $0xFF$ ), el paquete es aceptado para un procesamiento posterior, de otro modo el paquete es desechado. Los paquetes con requerimiento de ACK son transmitidos instantáneamente sin emplear el mecanismo CSMA/CA.

#### **V.5.6. Módulo de Asociación.**

Este módulo es responsable de ejecutar la etapa de *descubrimiento de topología*, de proveer con esta información a la etapa de *estimación de posición y balance de cargas* desarrolladas en MATLAB y de ejecutar la etapa tres de *Asociación de sensores*. Además, en este módulo se implementa la interfaz de comunicación entre OPNET y MATLAB descrita en la sección V.5.7.

El modelo de procesos de este módulo consta de cinco estados, como se muestra en la Figura 23. En el estado *init* se obtiene información de los nodos referente a su ID, el de sus nodos vecinos y la dirección MAC entre otros. Además, permite inicializar y asignar memoria a las variables necesarias dentro del proceso. Por su parte el estado *Pkt\_arrival* se activa después del arribo de paquetes provenientes de la capa de aplicación y la capa MAC, los cuales reciben un tratamiento diferente según su tipo. El estado *Waiting* es un estado no forzado que ejecuta las acciones de las interrupciones calendarizadas. Finalmente el estado *data\_Tx* almacena en una cola FIFO los mensajes a transmitir a capa MAC.

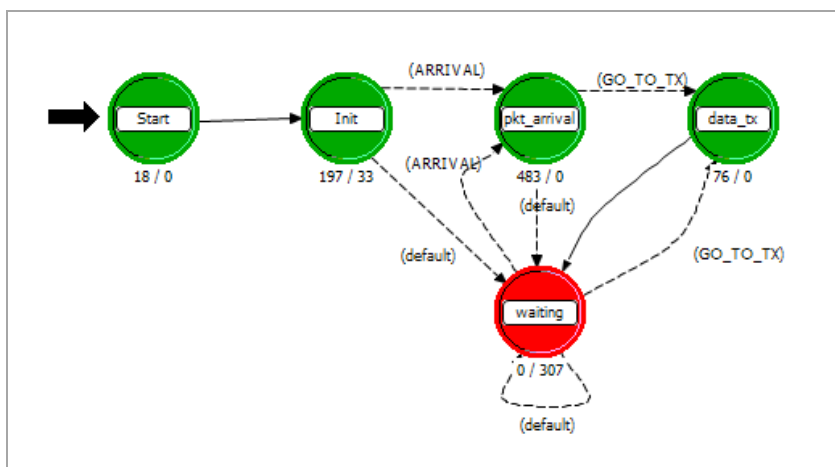


Figura 23. Modelo de procesos del módulo de Asociación.

### V.5.7. Interfaz de comunicación entre OPNET y MATLAB.

Es un procedimiento necesario para intercambiar información entre las herramientas de OPNET y MATLAB, con la finalidad de desarrollar en conjunto las etapas que componen al mecanismo propuesto, aprovechando las funcionalidades características de cada herramienta. Para ello fue necesario crear dos procedimientos, uno para el envío de información de OPNET a MATLAB y otro en sentido inverso. El primero permite proveer a MATLAB con la información necesaria (Topología de la red) para ejecutar las etapas de estimación de posición y balance de carga (etapas dos y tres) del mecanismo propuesto, explotando las capacidades de esta herramienta en el desarrollo de procesos matemáticos a través del manejo de matrices, dada la naturaleza de los algoritmos implementados. Por su parte el segundo procedimiento, tiene la función de entregar a OPNET los resultados obtenidos por MATLAB en las etapas dos y tres para proceder con la cuarta etapa, correspondiente a la Asociación de sensores.

Estos procedimientos consisten en generar archivos, en un formato específico, con la información a compartir entre estas herramientas y un ciclo que se



mantiene en estado de espera hasta la creación de los archivos. La Figura 24 muestra el algoritmo desarrollado para el intercambio de información entre OPNET y MATLAB, un procedimiento similar se realiza en el código de OPNET para la comunicación inversa.

```
function [NS, NA] = FILE_OPEN ( );

% Funcion que permite cargar automaticamente archivos generados por otro
% programa. Los archivos son cargados cuando estos son generados, de otra
% forma se queda dentro del ciclo enviando un mensaje de error.

fid=0;
existe_file=0;

message='Lo siento, El archivo aun no ha sido creado en OPNET';
message2='Pausa de 1 seg para que OPNET grabe los datos';
filename='C:\SalidaOPNET\listo.txt'

while existe_file~=2
    existe_file=exist(filename,'file');
    if existe_file~=2
        disp(message)
    end
end

disp(message2)
pause(25)

% Carga el valor del numero de sensores y actores
% NS y NA de un archivo generado por OPNET
if existe_file==2,
    NS= load('C:/SalidaOPNET/NS.txt')
    NA=load('C:/SalidaOPNET/NA.txt')
end
```

Figura 24. Procedimiento para intercambio de datos entre OPNET y MATLAB.

### V.5.8. Módulo de Enrutamiento.

En esta sección se utilizó el modelo desarrollado e implementado por (Gallardo López, *et ál.*, 2007), el cual se modificó para operar bajo el estándar IEEE 802.15.4 y en escenarios con varios actores. Una de las modificaciones fue la manera de obtener la dirección MAC del nodo, así como el procedimiento para estimar la energía consumida por los nodos y, por supuesto, el manejo de varios actores en vez de un solo sumidero.

En cuanto a la descripción de los estados del proceso, ésta es similar a la descrita en el módulo de *Asociación*, tal como se muestra en Figura 25, sólo que en este módulo se llevan a cabo el descubrimiento de rutas primarias, alternas y la asignación de pesos a las rutas, a través de la máquina de estados.

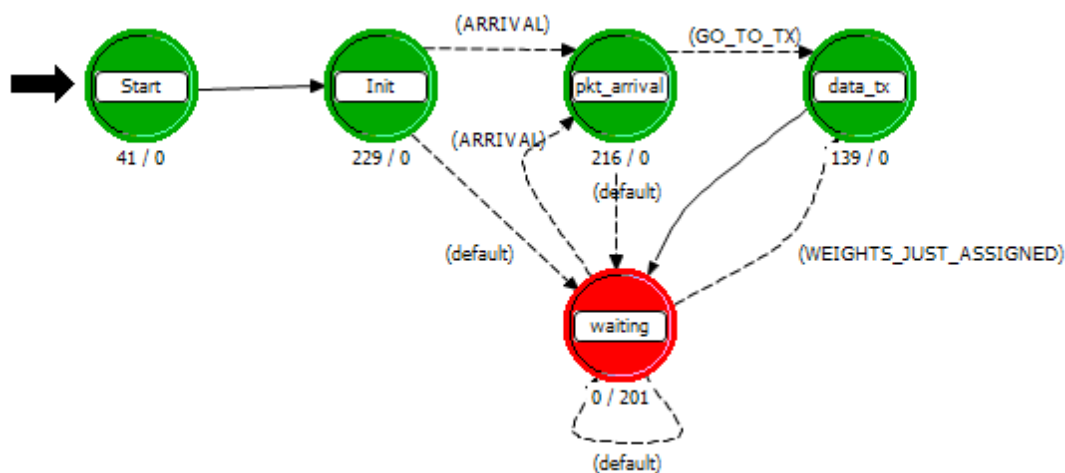


Figura 25. Modelo de procesos del módulo Multipath\_Routing.

### V.5.9. Modelo de comunicación.

El modelo de comunicación representa el procedimiento de flujo de datos en la pila de protocolos. La capa de aplicación genera un paquete de datos el cual es enviado a la capa de red y colocado en el buffer de enrutamiento de paquetes (cola FIFO calendarizada) hasta que el paquete está listo para transmitirse (bandera *PACKET\_READY\_TO\_SEND*). Cuando esto ocurre, el paquete es enviado a la capa MAC y transmitido con el mecanismo CSMA/CA no ranurado e inicia la espera de un ACK. Si el mensaje de ACK no es recibido, la transmisión se repite N veces en la capa MAC. Si continúa sin recibirse dicho mensaje, el paquete se

desecha y se envía un mensaje NAK a la capa de red. De lo contrario, se informa el arribo del mensaje ACK a la capa de red y el paquete actual es removido de las colas de la capa MAC y la capa de red. Este procedimiento se desarrolla mediante el algoritmo parada y espera.

## **V.6. Resumen.**

En este capítulo se presentó el modelo de simulación del mecanismo de coordinación propuesto, el cual está implementado en el simulador de redes OPNET y en el ambiente de cómputo numérico MATLAB. El modelo consta de dos tipos de nodos inalámbricos: actores móviles y nodos sensores fijos. Ambos utilizan el estándar IEEE 802.15.4 en modo sin beacon habilitado con CSMA/CA y poseen una pila de protocolos para la comunicación con otros nodos, la cual comprende desde la capa física hasta la capa de aplicación. Estas capas son implementadas como procesos separados para los diferentes módulos.

En la capa de red se implementan las cinco etapas del mecanismo propuesto. A nivel de capa de red se incluye un módulo llamado *Asociación*, responsable del descubrimiento de topología y de compartir con MATLAB la información de posición de los nodos, para el desarrollo de las etapas de estimación de posición y balance de cargas. Enseguida, MATLAB provee a OPNET, a través del módulo de *Asociación*, la posición estimada de los actores y la información referente al actor al cual se encuentra asociado cada uno de los sensores. Con esta información el módulo de *Asociación* lleva a cabo la etapa cuatro (Asociación de sensores) y activa una bandera para que un segundo módulo, llamado *Multipath\_Routing* ubicado en la capa de red, inicie el descubrimiento de rutas, correspondiente a la etapa cinco del mecanismo propuesto. Finalmente, cada nodo reporta la ocurrencia de un evento hacia su actor asociado, a través de la ruta principal descubierta en la etapa cinco.

En la capa de aplicación, se incluye un generador de datos, para tramas sin acuse de recibo y un módulo sumidero que calcula las estadísticas de los nodos. Adicionalmente, el modelo de nodo cuenta con un módulo, denominado *Battery*, que se emplea para el cálculo de la energía residual del nodo.

## Capítulo VI

---

### Resultados de Simulación

---

#### VI.1. Introducción.

En este capítulo se presentan los resultados de simulación del modelo descrito en el capítulo V, con los cuales se evaluó el desempeño del mecanismo de coordinación propuesto. La métrica principal a evaluar es el consumo de energía promedio en la red, el cual está directamente relacionado con el tiempo de vida de ésta. Otros parámetros de desempeño utilizados son el retardo extremo-extremo y la tasa de entrega de paquetes de datos, entendiendo por este último, la razón entre el número de paquetes recibidos en el destino y el número total de paquetes transmitidos a él. En cuanto a la validación de la propuesta, ésta se realiza comparando los resultados de desempeño bajo diferentes escenarios del modelo propuesto y un modelo de referencia en el cual no se implementa el mecanismo de coordinación diseñado (particularmente las etapas dos y tres).

#### VI.2. Escenarios de Simulación.

Para llevar a cabo el análisis de desempeño de la propuesta se realizó en OPNET un total de 150 simulaciones, clasificadas en dos grupos, en los cuales se identifican cuatro escenarios, uno en el primer grupo y tres en el segundo; además, de tres modelos de simulación: modelo 0, 1 y 2, como se muestra en la Tabla VI.

Tabla VI. Escenarios de Simulación.

Grupo	Escenarios			Modelos	
	Escenario	Densidad $D_{ATx}$ ( $n/A_{Tx}$ )	Número de Saltos	Modelo	Número de Actores ( $N_A$ )
<b>Grupo 1</b>	Escenario 0	1-70	2	Modelo 0 <sup>(1)</sup>	1
<b>Grupo 2</b>	Escenario 1	15	2	Modelo 0	1
				Modelo 1 <sup>(2)</sup>	3
				Modelo 2 <sup>(3)</sup>	3
	Escenario 2	25	2	Modelo 1	3
				Modelo 2	
	Escenario 3	6.3	3	Modelo 1	3
Modelo 2					

<sup>1</sup> Sin propuesta,  $N_A=1$ .

<sup>2</sup> Con propuesta,  $N_A=3$ .

<sup>3</sup> Sin propuesta,  $N_A=3$ .

El primer grupo de simulaciones está conformado por 80 corridas, que permitieron establecer algunos parámetros de simulación y seleccionar un conjunto de escenarios de prueba significativos, en los cuales validar la propuesta. Para ello, se evaluó la tasa de entrega de paquetes y el retardo extremo-extremo en un rango de densidades, medidas en términos del número de nodos por área de transmisión, de  $D_{ATx}^7 = 1$  a  $70n/A_{Tx}$  ( $n/A_{Tx}$ : nodos por área de transmisión) con incrementos de  $10n/A_{Tx}$ , y máximo dos saltos al actor raíz, representadas por el escenario 0 y, utilizando como modelo de referencia el modelo 0, en el que no se implementa el mecanismo propuesto y que además utiliza 1 solo actor ( $N_A=1$ ).

El segundo grupo corresponde a las 70 simulaciones restantes. Este grupo está integrado por tres escenarios de prueba (escenarios 1, 2 y 3) con densidades por

<sup>7</sup>  $D_{ATx}$ : Densidad de nodos por área de transmisión

área de transmisión y número de saltos al actor raíz diferentes, en los que se midió el consumo de energía, el retardo extremo-extremo y la tasa de entrega de paquetes de datos. Los escenarios 1 y 2 utilizan una densidad de  $D_{ATx} = 15n/A_{Tx}$  y  $25 n/A_{Tx}$  respectivamente, ambos con dos saltos al actor raíz; por su parte, el escenario 3 emplea una densidad  $D_{ATx} = 6.3n/A_{Tx}$  con tres saltos al actor raíz. Para los tres escenarios se evaluó y comparó el desempeño de dos modelos (modelo 1 y 2). En el modelo 1 se implementa el mecanismo de coordinación completo con sus cinco etapas, descritas en la sección IV.3 (descubrimiento de topología, estimación de posición, balance de cargas, asociación de sensores y enrutamiento); en cambio, el modelo 2 no incluye el mecanismo de coordinación. En ambos modelos se utilizan tres actores en la red. Además, para fines de referencia, como parte del escenario 1, se analiza el comportamiento del modelo 0, (modelo sin mecanismo de coordinación y con un solo actor).

En ambos grupos, para cada uno de los escenarios, con sus modelos correspondientes, se realizaron 10 simulaciones con topologías diferentes, es decir, 10 corridas para cada densidad y modelo. La Tabla VI muestra un resumen de los escenarios analizados, cuya justificación se presenta en la sección VI.2.2

En cuanto a la densidad por área de transmisión, se define como la cantidad de nodos desplegados dentro del área de la red, multiplicado por el área de cobertura del nodo, como se muestra en la ecuación 3, de ahí que la densidad sea medida en función de nodos por área de transmisión ( $n/A_{Tx}$ ).

$$D_{ATx} = \left( \frac{n}{A_{red}} \right) A_{nodo} = \left( \frac{n}{A_{red}} \right) \pi \cdot r^2 \quad (3)$$

donde:

- $n$ : Número de nodos desplegados en la red.
- $D_{ATx}$ : Densidad por área de transmisión.
- $A_{red}$ : Área de despliegue de la red.
- $A_{nodo}$ : Área de transmisión de los nodos.

Una vez delimitada el área de la red donde serán desplegados los nodos y especificando el radio de transmisión de éstos, es posible conocer la cantidad de nodos necesarios para obtener una densidad por área de transmisión definida, despejando  $n$  de la ecuación 3, tal como se muestra en la ecuación 4.

$$n = \frac{D_{ATx} * A_{red}}{A_{nodo}} = \frac{D_{ATx} * A_{red}}{\pi * r^2} \quad (4)$$

### VI.2.1. Parámetros de Simulación.

La Tabla VII resume los parámetros de simulación empleados en los escenarios propuestos.

Tabla VII. Parámetros de Simulación.

Aspecto	Parámetro	Valor
General	Densidad por área de transmisión	1 a 70 n/A <sub>TX</sub> para el grupo 1 6.3, 15, 25 n/A <sub>TX</sub> para el grupo 2
	Número de nodos sensores	2 a 140 para el grupo 1 30, 50 para el grupo 2
	Número de nodos actores	3 y 1
	Área de la red (A <sub>red</sub> )	625m <sup>2</sup> (25m x 25m)
	Tiempo de simulación	60 segundos de transmisión de datos
	Topologías por cada densidad	10
	Máx. núm. de saltos al actor	3
Capa Física	Energía inicial	10 Joules
	Potencia de Transmisión	52.2 mW
	Potencia de Recepción	59.1mW
	Radio de Transmisión	10m (Área de 314.16m <sup>2</sup> ) y 5m (Área de 78.53m <sup>2</sup> )
	Tasa de Transmisión	250 Kbps
	Banda de frecuencia	2.4 GHz
Capa MAC	Mecanismo de comunicación	CSMA-CA no ranurado
	Máximo número de reintentos	255
	Mínimo exponente de <i>Bakoff</i> :	3
	Máximo número de <i>Backoff</i> :	4
Capa Aplicación	Tamaño de los paquetes de datos	100 bits
	Tipo de tráfico	CBR
	Tiempo de inter arribo	1 seg



Se emplea una capa física compatible con el estándar IEEE 802.15.4 (CSMA/CA no ranurado) que opera en la banda de frecuencia de 2.4GHz con una tasa de transmisión de 250 Kbps y un rango de transmisión  $r$  de 10 m. Se considera una energía inicial de 10 Joules y una potencia de transmisión de 52.2 mW.

En la capa MAC se considera que los nodos transmiten utilizando el mecanismo CSMA/CA no ranurado en modo sin beacon habilitado, con un valor de  $K_{\text{máx}} = 255$  reintentos de transmisión y un exponente de retracción de  $BE_{\text{mín}} = 3$ . Estos valores fueron seleccionados por ser los que tuvieron mejores resultados en cuanto a la reducción en la pérdida de paquetes. Los resultados mencionados son mostrados en la sección VI.2.2.

En la capa de red, no se considera la actualización periódica de rutas; es decir, cada nodo descubre las rutas hacia su actor raíz una sola vez y selecciona una de ellas probabilísticamente, en función de sus pesos, para el envío de los datos durante todo el tiempo de simulación.

En la capa de aplicación cada nodo sensor cuenta con un módulo generador de tráfico CBR (Constant Bit Rate), el cual genera paquetes con un tiempo de inter-arribo de 1 segundo.

## **VI.2.2. Justificación de Escenarios de Prueba.**

La utilidad de los modelos para conocer o predecir está condicionada, principalmente, por una buena selección de los factores relevantes para el problema y una adecuada descripción de sus relaciones funcionales. Así, cuando se construye un modelo, se forma un sistema cuyos componentes se han reducido a una cantidad manejable para simplificar el sistema real. Para que los resultados sean aceptables es necesaria una precisa selección de los componentes

importantes, cada uno de los cuales debe, a su vez, ser un modelo adecuado del componente real.

Existe una amplia variedad de escenarios en los cuales evaluar el desempeño de esta propuesta. Con el fin de acotar a un conjunto finito significativo de escenarios a simular, se evaluó el desempeño de una red con un solo actor sin implementar el mecanismo propuesto (modelo 0), con las siguientes características:

- Un solo actor posicionado en el centro del área de despliegue de la red.
- Área de despliegue de la red de  $625 \text{ m}^2$  (25 m x 25 m).
- Radio de transmisión de los nodos de 10 m (Área de  $314.16 \text{ m}^2$ ).
- Barrido de diferentes densidades de red, que van de 1-70  $n/A_{Tx}$  (Nodos por área de transmisión).
- 10 topologías de red aleatorias por cada densidad.
- Intervalo de confianza del 95%.
- Tipo de fuente de tráfico: CBR.
- Tamaño de paquete de datos: 100bits.
- Tasa de generación de paquetes por nodo: 1s.
- Dos conjuntos de simulaciones con parámetros diferentes de acceso al medio:
  - 2/3/4 (Exponente mínimo de retracción " $BE_{\min}$ " / Máximo número de reintentos " $K_{\max}$ " / Máximo número de retracciones por intento " $NB_{\max}$ ").
  - 3/255/4 (Exponente mínimo de retracción " $BE_{\min}$ " / Máximo número de reintentos " $K_{\max}$ " / Máximo número de retracciones por intento " $NB_{\max}$ ").

Una red con más de un actor como sumidero tendrá un mejor desempeño que empleando un solo actor, como se mostrará en resultados más adelante. Las

simulaciones anteriores son útiles para definir en qué escenarios se saturan las redes con un solo actor. Esto permitirá elegir redes no saturadas, para simular la propuesta y así, evaluar el desempeño del mecanismo sin la perturbación introducida por pérdidas de paquetes, debido a colisiones o al derrame de las colas de servicio.

En la Figura 26 se observa la tasa promedio de entrega de paquetes de datos para los dos conjuntos de simulaciones. Se puede observar que el escenario con  $BE_{\min}=3$  y  $K_{\max}=255$  presenta una tasa de entrega de paquetes del 100% para el rango de densidades de 1 a 30  $n/A_{TX}$ , contrario al escenario con  $BE_{\min}=2$  y  $K_{\max}=3$ , el cual decrece abruptamente para una densidad de 10  $n/A_{TX}$ . Con esto se observa que el máximo número de intentos de retransmisión original ( $K_{\max}=3$ ) no es adecuado para densidades mayores o iguales a 10  $n/A_{TX}$ , por lo que es necesario incrementarlo a  $K_{\max}=255$  para realizar la evaluación de la propuesta en densidades de 1 a 30  $n/A_{TX}$ , sin tener descarte de paquetes por haber alcanzado el número máximo permitido de colisiones.

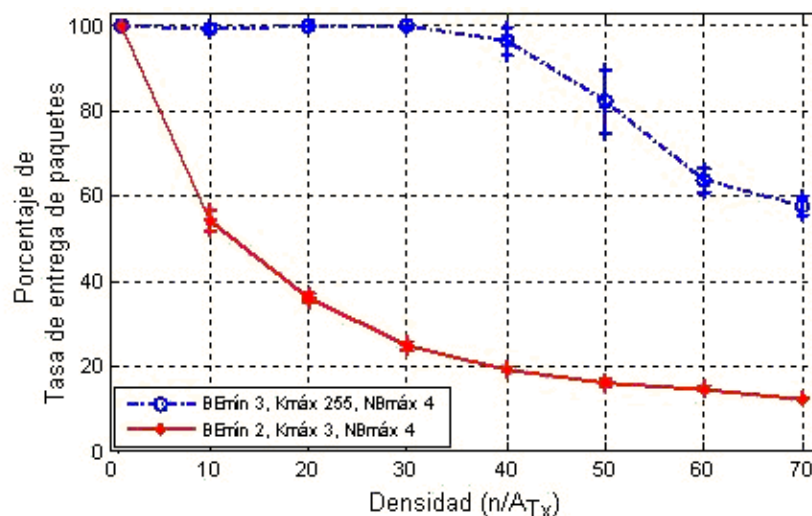


Figura 26. Tasa de entrega de paquetes para diferentes parámetros MAC.

En la Figura 27 se muestra el retardo promedio de paquetes en la red. Se observa que para los valores de  $BE_{\min}$  y  $K_{\max}$  más grandes, se incrementa el retardo extremo-extremo en la entrega de paquetes. Lo anterior se debe a que el incremento en el valor de  $K_{\max}$  de 3 a 255 provoca que los nodos reintenten transmitir más veces cada paquete de datos antes de tener éxito, y a que el aumento de 2 a 3 en  $BE_{\min}$  hace que los tiempos de retracción sean un poco más grandes, evitando así colisiones y logrando transmisiones exitosas, a cambio de un incremento en el retardo de los paquetes. Recordando que el tiempo que transcurre entre la generación de paquetes consecutivos es de 1s, sólo las redes por debajo de  $40 n/A_{Tx}$  cumplen con un retardo de entrega de paquetes menor al de generación de los mismos, evitando que se saturen las colas de servicio de los nodos.

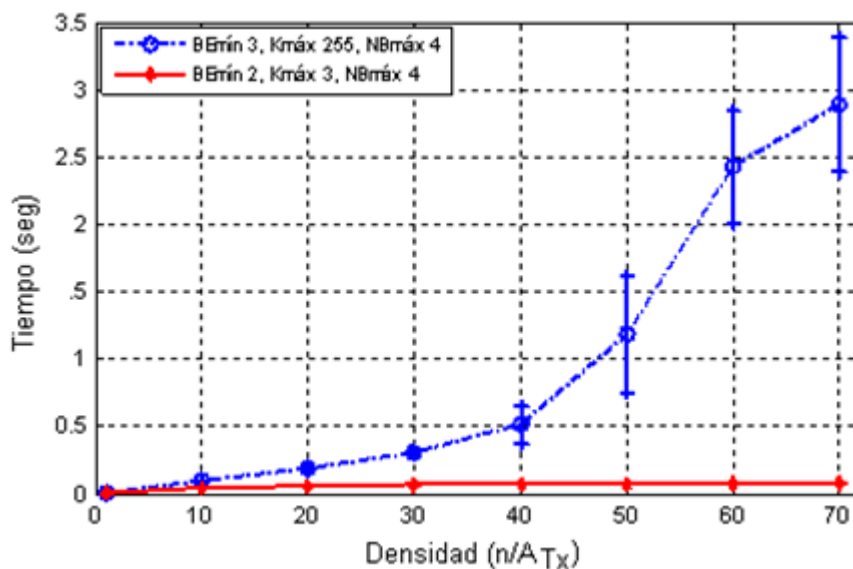


Figura 27. Retardo extremo-extremo para diferentes parámetros MAC.

En base al análisis anterior se propuso evaluar el sistema para escenarios con densidades de área de transmisión en el rango de 0 a  $30 n/A_{Tx}$  con  $BE_{\min} = 3$  y

$K_{\text{máx}} = 255$ , debido a que en éstos se tiene tanto una tasa de entrega de paquetes del 100% como un retardo por debajo de la tasa de generación de los mismos.

Es necesario calcular el límite inferior de la densidad de nodos por área de transmisión, de tal manera que exista conectividad entre todos los nodos de la red. Para ello se realizaron en Matlab 10 simulaciones con 1000 topologías diferentes para densidades de 10 a 100 nodos por área de la red, sumando un total de 10,000 corridas, en las cuales se evaluó la conectividad de los nodos en base a la topología de la red. Se considera que una topología no tiene conectividad, si existe al menos un nodo que no cuente con un camino directo o a través de multi-saltos para comunicarse con cualquier otro nodo en la red. La Figura 28 muestra el porcentaje de conectividad para diferentes densidades de red, utilizando un área de 25 m x 25 m y un radio de transmisión  $r = 10$  m. En esta figura se observa una conectividad del 100% para densidades superiores a  $25 \text{ n/A}_{\text{Tx}}$  y una conectividad del 98% para densidades de  $15 \text{ n/A}_{\text{Tx}}$ . Con la finalidad de asegurarse de que el sistema es evaluado en escenarios que posean alta probabilidad de conectividad y una tasa de entrega de paquetes del 100%, se seleccionaron escenarios con densidades de 15 y  $25 \text{ n/A}_{\text{Tx}}$ . Para observar el efecto del número de saltos de los nodos sensores hacia su actor raíz en el consumo de energía, se redujo el radio de transmisión a  $r = 5$  m, lo que generó una densidad de  $6.3 \text{ n/A}_{\text{Tx}}$  con una conectividad del 27%. Para este escenario, sólo se consideraron las topologías que presentaron conectividad.

Acorde a la ecuación 4 y para valores de  $A_{\text{red}} = 25 \text{ m}^2$  y  $r = 10$  m, los escenarios con 15 y  $25 \text{ n/A}_{\text{Tx}}$  corresponden a un despliegue de 30 y 50 nodos respectivamente, mientras que para una  $A_{\text{red}} = 25 \text{ m}^2$  y  $r = 5$  m, se requieren de 50 nodos para tener una densidad de  $6.3 \text{ n/A}_{\text{Tx}}$ .

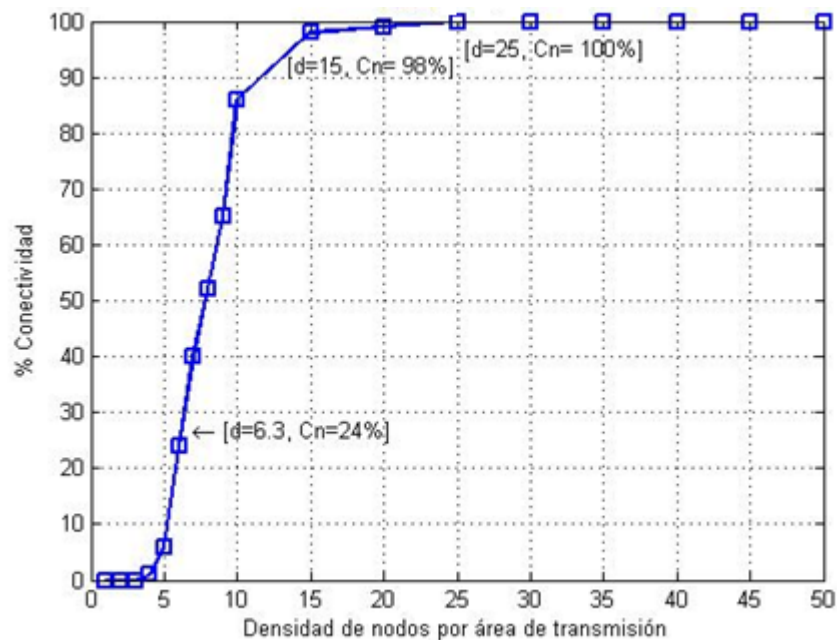


Figura 28. Conectividad de los nodos en un área 25m<sup>2</sup>.

### VI.3. Análisis de Resultados.

El análisis de resultados para los escenarios de prueba está organizado de la siguiente manera: primero, se presentan los resultados de desempeño generados con OPNET durante un ciclo de 60 segundos de transmisión de datos sensados, en los que se comparan las métricas obtenidas para los tres modelos de prueba (modelo 0, 1 y 2), descritos en la Tabla VI. Enseguida, se muestran el consumo de energía y el retardo de configuración del modelo, provocado por la señalización necesaria para implementar el mecanismo propuesto. Finalmente se analizan el desempeño de las etapas de estimación de posición y el balance de carga en los actores, desde el punto de vista operativo, a través de la herramienta MATLAB.

### **VI.3.1. Métricas de desempeño durante la transmisión de datos.**

A continuación se analizan las métricas de consumo de energía, el retardo extremo-extremo y la tasa de entrega de paquetes, para los escenarios 1, 2 y 3, experimentado por el reporte de un evento durante 60 segundos, con una tasa de inter arribo de 1 segundo.

#### **VI.3.1.1. Escenario 1: $D_{ATx} = 15n/A_{Tx}$ .**

Se compara el desempeño observado para los modelos 0,1 y 2 en el escenario 1 ( $D_{ATx}=15 n/A_{Tx}$ ). Las Figuras 29, 30 y 31 muestran los valores de energía, retraso y tasa de entrega de paquetes respectivamente, para los modelos analizados. El desempeño de estos modelos es representado por tres curvas en cada gráfica: la curva negra ( $\square$ ) caracteriza al modelo 0, la roja ( $\circ$ ) al modelo 1, y la azul ( $\blacktriangle$ ) al modelo 2. Además, para cada modelo se incluye el valor promedio de las simulaciones con un intervalo de confianza del 95%, posicionados en los últimos tres valores del eje X para su fácil identificación.

La Figura 29 muestra la energía promedio consumida por los tres modelos. Se aprecia que el modelo 0 (negro,  $\square$ ) presenta el mayor consumo de energía de la red, con un valor de 0.0590131 J; en cambio, los modelos 1 y 2 (rojo,  $\circ$  y azul,  $\blacktriangle$ ) exhiben resultados muy similares con un consumo de energía de sólo 0.03646 J y 0.0386696 J respectivamente. Se observa que la propuesta de este trabajo produce un menor consumo de energía y se espera que el ahorro de energía se vea reflejado en mayor proporción, para escenarios de mayor densidad y número de saltos hacia el actor raíz.

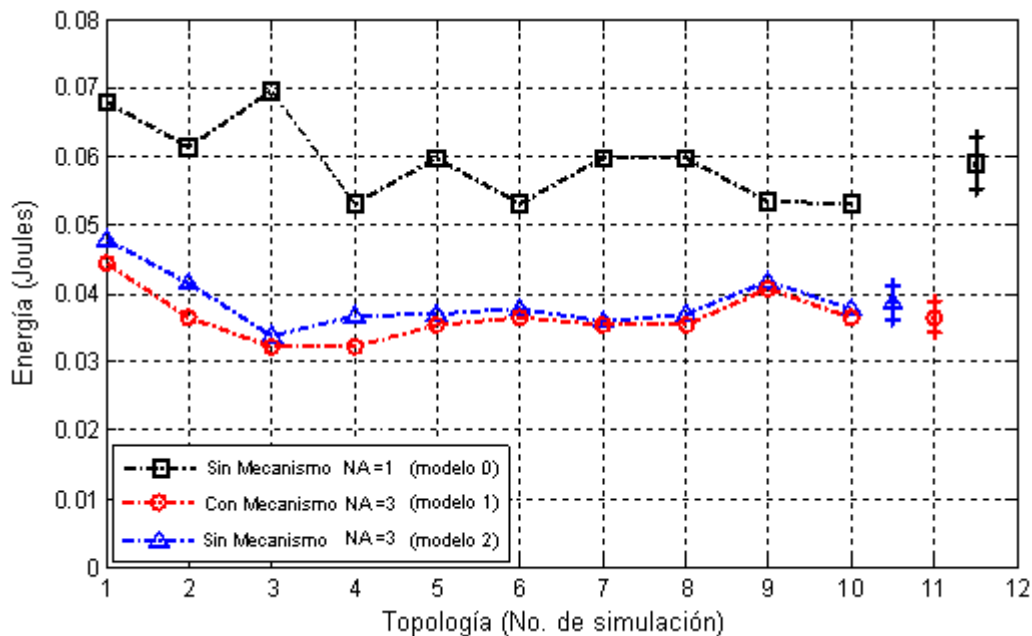


Figura 29. Consumo de energía para  $D_{ATx}=15n/A_{Tx}$ .

En la Figura 30 se presenta el retardo promedio experimentado por los paquetes de datos (aplicación) de cada uno de los modelos abordados. Este retardo no involucra el retardo de configuración de la red, provocado por los mensajes de señalización del mecanismo propuesto. Se observa que al utilizar el mecanismo propuesto, modelo 1 (rojo,  $\circ$ ), el retardo disminuye a un valor promedio de 0.0549s y 0.0809s sin aplicar la propuesta (modelo 2), en comparación con los 0.1376s que se requieren si no se aplica la propuesta y se emplea un solo actor (modelo 0). Esta mejora es debida a que los nodos sensores se localizan más cerca de su actor raíz. En la misma figura se observa la inconveniencia de emplear un solo actor en la red, ya que en ese caso se genera un cuello de botella alrededor del actor. Esto impide a más de un solo nodo transmitir datos al actor a la vez, mientras que con tres actores, en el mejor de los casos, cuando los actores no interfieren entre sí, recibirían datos simultáneamente, lo que evidentemente reduce el retardo de entrega de paquetes. Si además de introducir tres actores, en vez de uno solo, se aplica el mecanismo propuesto (específicamente las etapas de



estimación de posición y balance de carga en los actores), se logra reducir aún más el retraso de entrega de paquetes.

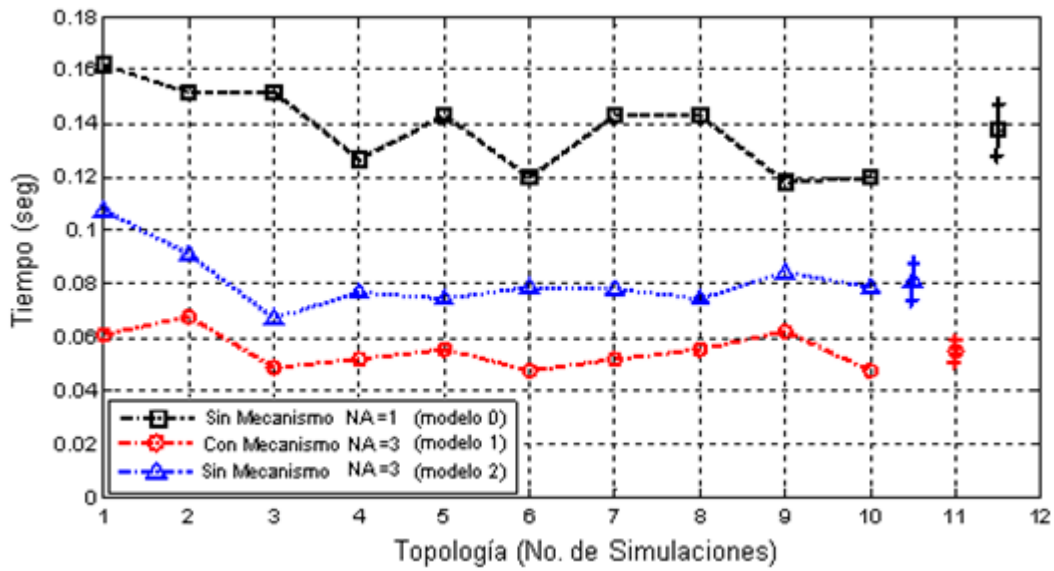


Figura 30. Retraso en la entrega de paquetes de datos para  $D_{ATx}=15n/A_{Tx}$ .

La Tabla VIII resume los resultados promedios de energía y retardo obtenidos de las Figuras 29 y 30 en las que se demuestra que emplear múltiples actores, en vez de uno solo, reduce considerablemente la energía consumida y el retraso de entrega de paquetes. En este caso, al comparar los modelos 0 y 2, se observa que a pesar de no aplicar el mecanismo propuesto, al incrementar el número de actores de 1 a 3 (modelo 2) existe una reducción de aproximadamente el 34% en energía y el 41% en retardo. Aunado a este resultado, se logra una reducción extra (3% y 19% en energía y retardo respectivamente) al realizar la estimación de posición de los actores y el balance de cargas entre éstos (comparación del modelo 0 y el modelo 1).

Tabla VIII. Comparación de energía y retardo para  $D_{ATx} = 15n/A_{Tx}$ .

Parámetro de desempeño	Modelo 0 ( $N_A=1$ ; $^1SM$ )	Modelo 1 ( $N_A=3$ ; $^2CM$ )	Modelo 2 ( $N_A=3$ ; $^1SM$ )	Modelo 0 Vs Modelo 2 $\Delta(M_0-M_2)$	Modelo 0 Vs Modelo 1 $\Delta(M_0-M_1)$	Modelo 1 Vs Modelo 2 $\Delta(M_2-M_1)$
Energía consumida	0.0590131 J	0.03646 J	0.0386696 J	34.47%	38.21%	5.71%
Retardo	0.1376 seg	0.0549 seg	0.0809 seg	41.2%	60.10%	32.13%

<sup>1</sup>SM: sin mecanismo de coordinación  
<sup>2</sup>CM: con mecanismo de coordinación

La Figura 31 muestra el caudal de entrega de paquetes de datos para los tres modelos en cuestión. Se ve que, gracias a la selección de los escenarios de validación para estos modelos, se tiene un caudal de entrega de paquetes de datos del 100%, medido desde la capa de red. Este caudal permite confiar en que los resultados de energía y retraso de paquetes, no se verán influenciados por colas de servicio saturadas o paquetes que no completan su trayectoria hasta su respectivo actor.

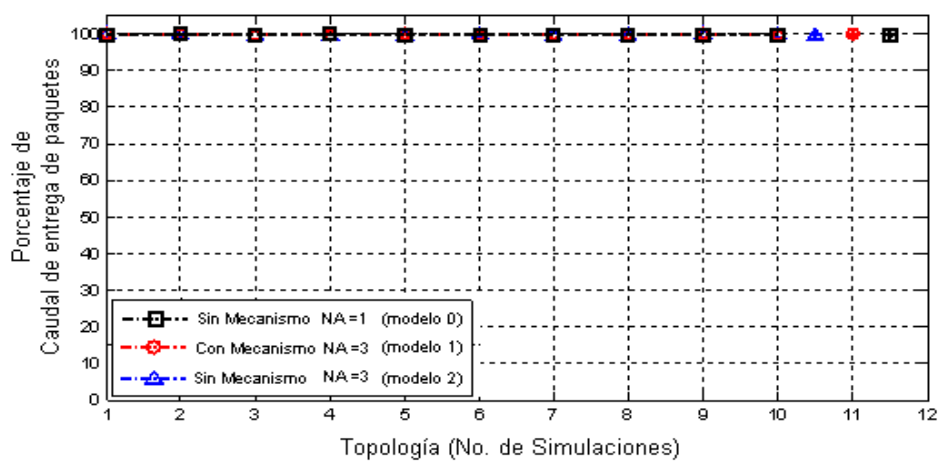


Figura 31. Caudal de entrega de paquetes de datos para  $D_{ATx} = 15n/A_{Tx}$ .

**VI.3.1.2. Escenario 2:  $D_{ATx}=25n/A_{Tx}$ .**

Las Figuras 32, 33 y 34 muestran el desempeño de la propuesta en escenarios con una densidad de  $25 n/A_{Tx}$ . En la Figura 32 se muestra la energía consumida para los modelos 1 (con mecanismo de coordinación) y 2 (sin mecanismo). Se observa que la energía consumida promedio por escenario es de 0.05442 J y 0.060054J, con y sin mecanismo de coordinación respectivamente. De la Tabla IX, en la cual se resumen los resultados obtenidos para las densidades analizadas en los escenarios 1 y 2, se observa que, comparando la energía consumida en los escenarios con  $D_{ATx}= 15$  y  $25 n/A_{Tx}$  (0.03866 J y 0.03646 J extraídos de la Figura 29), a mayor densidad de nodos se consume mayor energía.

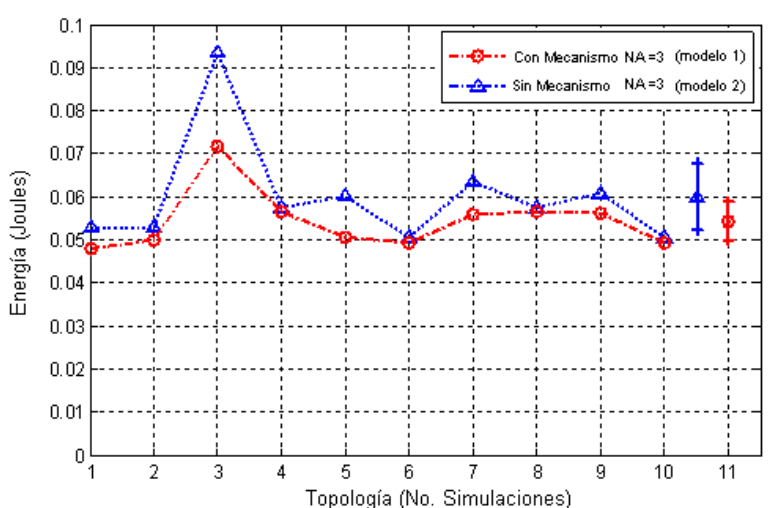


Figura 32. Energía promedio consumida para  $D_{ATx}= 25n/A_{Tx}$ .

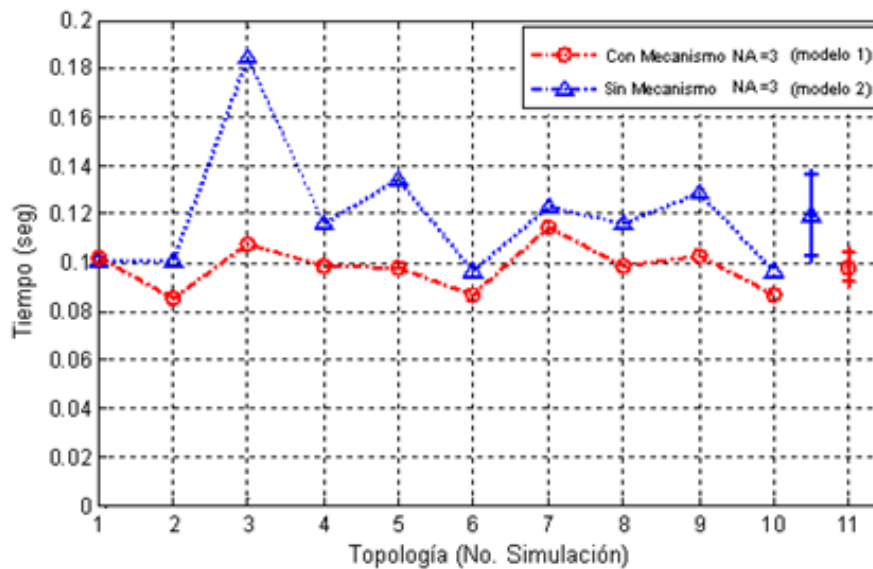
En la Figura 33 se ilustra el retraso promedio de entrega de paquetes de datos, para el escenario 2, con valores de 0.098175s y 0.11956s para los modelos 1 y 2 respectivamente. Comparando estos resultados con los obtenidos en el primer escenario con  $D_{ATx}= 15n/A_{Tx}$  (0.0549s y 0.0809s extraídos de la Figura 30 y mostrados en la Tabla IX), se observa que a mayor densidad de nodos, se consume mayor tiempo en la entrega de paquetes de datos hacia el actor raíz.

Tabla IX. Energía consumida y retardo extremo-extremo para  $D_{ATx}=15$  y  $25n/A_{Tx}$ .

Densidad ( $n/A_{Tx}$ )	Parámetro de desempeño	Modelo 1 ( $N_A=3$ ; $^1CMc$ )	Modelo 2 ( $N_A=3$ ; $^2SMc$ )
$D=15n/A_{Tx}$	Energía consumida	0.03646 J	0.0386696 J
	Retardo	0.0549 seg	0.0809 seg
$D=25 n/A_{Tx}$	Energía consumida	0.05442 J	0.060054 J
	Retardo	0.098175 seg	0.11956 seg

<sup>1</sup>CMc: con mecanismo de coordinación implementado

<sup>2</sup>SMc: sin mecanismo de coordinación implementado

Figura 33. Retraso de entrega de paquetes de datos para  $D_{ATx}=25 n/A_{Tx}$ .

En la Figura 34 se observa la tasa o caudal de entrega de paquetes de datos, considerando escenarios con  $25n/A_{Tx}$ . Tal como se describió en el apartado 7.2, los escenarios abordados logran un caudal de entrega de paquetes de datos de 100%.

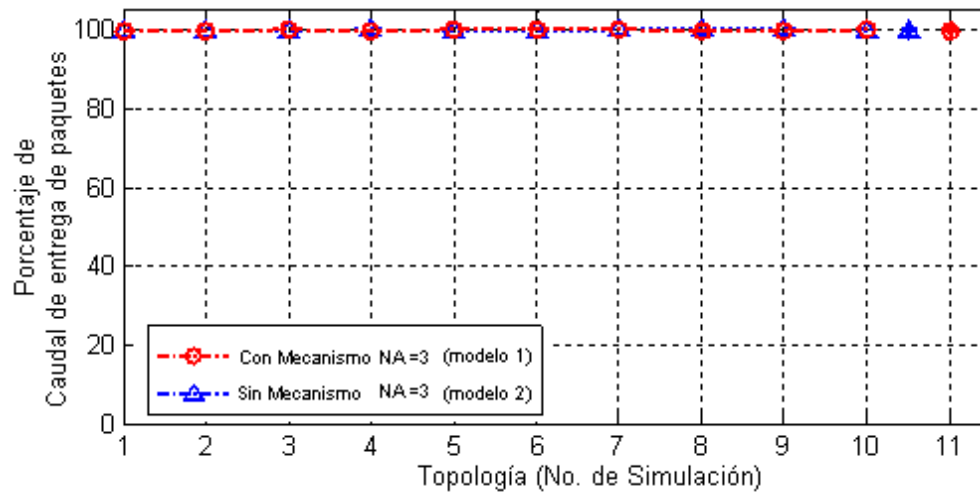


Figura 34. Caudal de entrega de paquetes de datos para  $D_{ATX}=25 n/A_{TX}$ .

### VI.3.1.3. Escenario 3: $D_{ATX}=6.3 n/A_{TX}$ .

Las Figuras 35, 36 y 37 muestran el desempeño de la propuesta en redes con una densidad de  $6.3 n/A_{TX}$ . La peculiaridad del siguiente escenario es que se ajustó el radio de transmisión a 5 m, logrando así que el máximo número de saltos para llegar a un actor se incremente a tres, en contraste con los resultados mostrados anteriormente, en donde las redes simuladas mantienen un máximo de dos saltos para llegar a los actores. La Figura 35 muestra la energía consumida por el escenario 3 con  $r=5$  m para los modelos con y sin mecanismo de coordinación (modelos 1 y 2), en la cual se observa que la energía promedio consumida es de 0.04985 J y 0.05725 J para los modelos 1 y 2 respectivamente.

En cuanto al retraso en la entrega de paquetes de datos, éste se muestra en la Figura 36, y se observa que para este escenario ( $D_{ATX}= 6.3 n/A_{TX}$ ) los retrasos en la entrega de paquetes corresponden a 0.08402s y 0.11406s para los modelos 1 y 2 respectivamente.

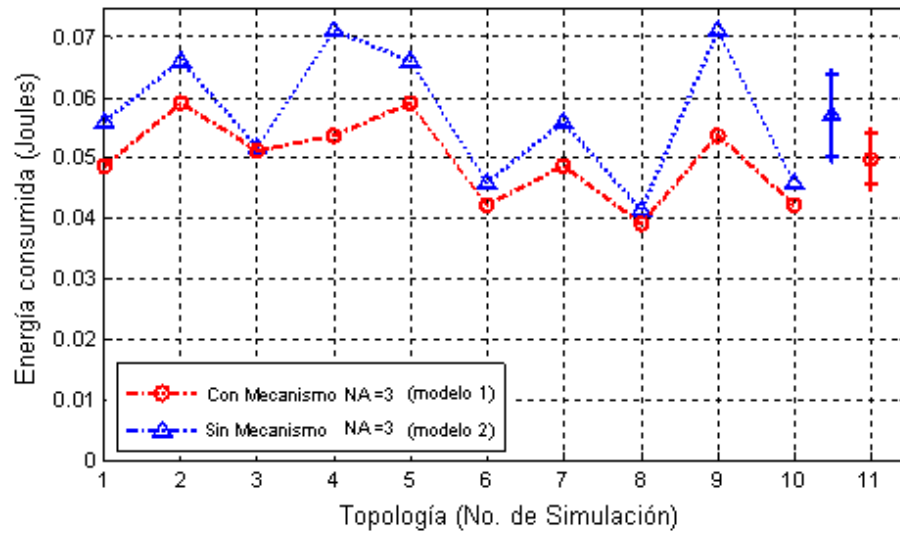


Figura 35. Energía promedio consumida para  $D_{ATx} = 6.3 \text{ n}/A_{Tx}$  y  $r = 5 \text{ m}$ .

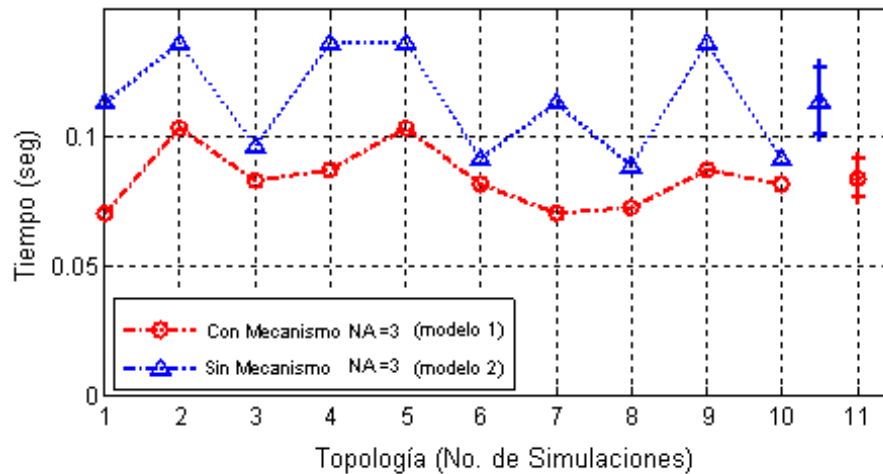


Figura 36. Retraso de entrega de paquetes de datos para  $D_{ATx} = 6.3 \text{ n}/A_{Tx}$ .

Si se cuantifica la diferencia en el consumo de energía, entre utilizar o no el mecanismo propuesto, como se muestra en la Tabla X, se tiene que para el primer escenario con densidad  $15 \text{ n}/A_{Tx}$  y radio de transmisión de  $10 \text{ m}$ , la diferencia

entre los modelos 1 y 2 es del 5.7%. En el caso de  $D_{ATX} = 25 \text{ n}/A_{TX}$  y radio de transmisión de 10 m, esta diferencia es del 9.38%. Este mismo parámetro para el escenario con  $D_{ATX} = 6.3 \text{ n}/A_{TX}$  y radio de transmisión de 5 m, es de 12.92%. Recordando que el escenario 3 con radio de 5 m presentan un incremento de un salto más hacia los actores, se puede concluir que en cuanto a ahorro de energía, el mecanismo de coordinación es más efectivo conforme se incrementa el número de saltos en la red, y aún más cuando se presenta un incremento de la densidad de la misma.

Tabla X. Resumen de resultados de energía y retardo para las densidades analizadas.

Densidad ( $n/A_{TX}$ )	Parámetro de desempeño	Modelo 1 ( $N_A=3$ ; C/MC)	Modelo 2 ( $N_A=3$ ; S/MC)	Modelo 1 Vs Modelo 2 $\Delta(M_1-M_2)$
D=15n/ $A_{TX}$	Energía consumida	0.03646 J	0.0386696 J	5.71%
	Retardo	0.0549 seg	0.0809 seg	32.13%
D=25 n/ $A_{TX}$	Energía consumida	0.05442 J	0.060054 J	9.38%
	Retardo	0.098175 seg	0.11956 seg	17.88%
D=6.3n/ $A_{TX}$	Energía consumida	0.04985 J	0.05725 J	12.92%
	Retardo	0.08402s	0.11406s	26.33%

Si se cuantifica la diferencia en el consumo de energía, entre utilizar o no el mecanismo propuesto, como se muestra en la Tabla X, se tiene que para el primer escenario con densidad 15  $n/A_{TX}$  y radio de transmisión de 10 m, la diferencia entre los modelos 1 y 2 es del 5.7%. En el caso de 25  $n/A_{TX}$  y radio de transmisión de 10 m, esta diferencia es del 9.38%. Este mismo parámetro en escenarios con 6.3  $n/A_{TX}$  y radio de transmisión de 5 m, es de 12.92%. Recordando que los escenarios con radio de 5 m presentan un incremento de un salto más hacia los

actores, se puede concluir que en cuanto a ahorro de energía, el mecanismo de coordinación es más efectivo conforme se incrementa el número de saltos en la red, y aún más cuando se presenta un incremento de la densidad de la misma.

Si de la misma manera se cuantifica la diferencia en el retraso de entrega de paquetes, entre aplicar o no el mecanismo propuesto se tiene que para el escenario con densidad  $15 \text{ n/A}_{\text{Tx}}$  y radio de transmisión 10 m, la diferencia en el retraso para los modelos 1 y 2 es del 32.1% en relación al retraso del modelo 2. En el caso de  $D_{\text{ATX}} = 25 \text{ n/A}_{\text{Tx}}$  y radio de transmisión de 10 m, esta diferencia es de 17.8%. Esta misma diferencia, en escenarios con  $D_{\text{ATX}} = 6.3 \text{ n/A}_{\text{Tx}}$  y radio de transmisión de 5 m, es de 26.3%. De lo anterior se infiere que si bien el mecanismo propuesto disminuye el retardo de entrega de paquetes de datos, la diferencia entre aplicar o no dicho mecanismo se incrementa conforme aumenta la densidad o el número de saltos hacia los actores.

Por su parte, la Figura 37, muestra que el caudal de entrega de paquetes de datos se mantiene al 100% como se planeó en la selección de escenarios de validación.

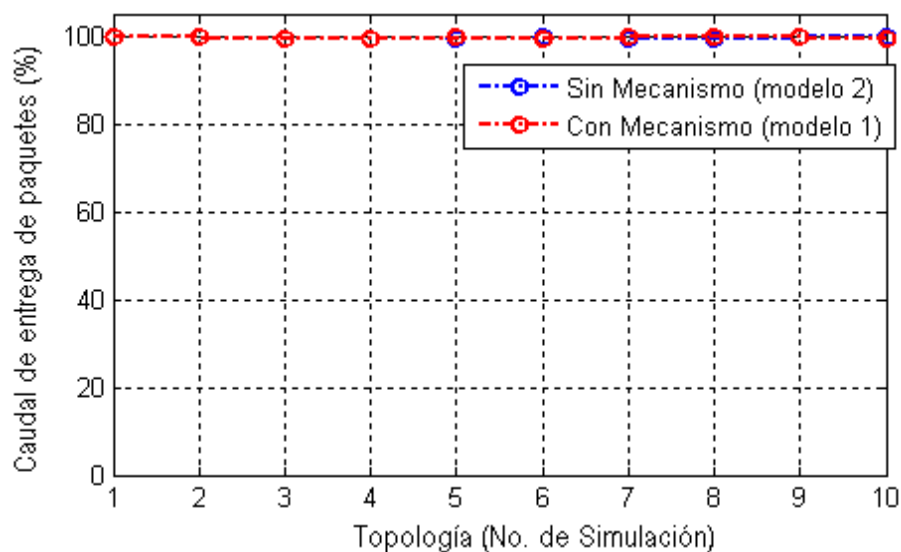


Figura 37. Caudal de entrega de paquetes de datos para  $D_{\text{ATX}} = 6.3 \text{ n/A}_{\text{Tx}}$ .



### **VI.3.2. Impacto del proceso de configuración en las métricas de desempeño.**

El objetivo de este apartado es medir el impacto que tienen los mensajes de señalización, generados por el mecanismo de coordinación, en el consumo de energía y en el retardo extremo-extremo. Las métricas mencionadas son analizadas para los escenarios 1 y 2, utilizando el modelo 1.

La Figura 38, muestra el consumo de energía ocasionado por la señalización para configurar el mecanismo de coordinación propuesto, sin considerar la etapa de enrutamiento. Para el escenario 1 ( $D_{ATX} = 15 \text{ n/A}_{TX}$ ), el valor promedio de éste parámetro (0.0176647 J), representa el 48% de la energía consumida durante un ciclo de 60 segundos de transmisiones de datos (0.0364681 J). Aparentemente este es un valor alto, sin embargo, es necesario considerar que el proceso de configuración sólo se realiza cada vez que se presentan cambios drásticos en la topología (lo cual depende de los requerimientos de la aplicación y la frecuencia del evento), y que el tiempo simulado para la transferencia de datos fue apenas de 60 segundos. Es posible disminuir el impacto de la energía consumida durante la configuración y, justificar la aplicación del mecanismo de coordinación propuesto, si se determina el tiempo de equilibrio ( $T_E$ ) dado por la ecuación 5, y éste es menor que el tiempo transcurrido entre una configuración y otra ( $T_C$ ). El tiempo de equilibrio ( $T_E$ ) representa el tiempo para el cual, la energía consumida por la configuración del sistema ( $E_C$ ), más la energía consumida durante la transmisión de datos ( $E_M$ ) en un cierto tiempo, es menor que la energía consumida sin emplear el mecanismo propuesto ( $E_S$ ). Resolviendo la ecuación con los valores de energía para  $D_{ATX} = 15 \text{ n/A}_{TX}$ , se obtiene que  $T_E = 8 \text{ min}$ . Por lo tanto, para tiempos entre una configuración y otra, mayores a este valor, se justifica el empleo del mecanismo propuesto, debido a que se logra un ahorro en el consumo de energía de los nodos.

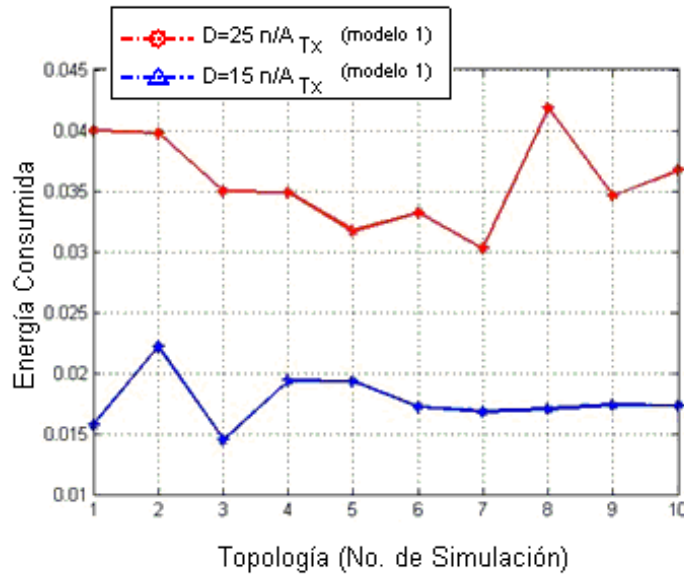


Figura 38. Energía consumida por señalización para  $D_{ATx}=15$  y  $25$   $n/A_{Tx}$ .

$$E_C + E_M * T_E \leq E_S * T_E \quad \forall T \geq T_E, \quad E_M > E_S \quad (5)$$

Donde:

$E_C$ : Energía consumida por la configuración del sistema.

$E_M$ : Energía consumida durante la transmisión de datos utilizando el mecanismos propuesto.

$E_S$ : Energía consumida durante la transmisión de datos sin emplear el mecanismos propuesto.

$T_E$ : Tiempo de equilibrio.

En casos cuando la energía se consume en extremo inequitativamente, la información de energía residual en los nodos se puede incluir en los paquetes de sensado, enviados al actor correspondiente durante la ocurrencia de un evento. De esta manera, sería posible volver a calcular la posición de los actores acorde a la energía residual de los nodos. Dado que se conoce la topología de la red y la

energía residual de los sensores, es relativamente sencillo y económico, en cuestión de energía, volver a calcular las posiciones para los actores. En base a estos resultados, se observa que el ahorro en energía por posicionar a los actores más cerca de los sensores asociados, es mucho mayor al consumo de energía provocado por este proceso, aunado a un consumo de energía más homogéneo en los sensores durante el reporte del evento, logrando así, el objetivo de extender el tiempo de vida de la red.

En cuanto al retardo, se observó un promedio de 38 segundos para el proceso de configuración, el cual se repetirá cada vez que los cambios en la topología lo demanden. Como se mencionó previamente, el tiempo transcurrido entre una configuración y otra depende directamente de la frecuencia del evento y el consumo de energía de la aplicación, sin embargo se estima que éste puede ser mucho mayor que el tiempo de equilibrio, por lo que el tiempo de configuración se considera despreciable.

### **VI.3.3. Desempeño de las etapas de estimación de posición y balance de cargas.**

Para analizar el desempeño de las etapas de estimación de posición y de balance de cargas del mecanismo propuesto, se compara la topología inicial, durante el despliegue aleatorio de nodos, con la topología resultante de la implementación de las etapas 2 y 3 de la propuesta. Se analiza la distribución de los nodos en los diferentes grupos (*“clusters”*), la reducción en distancia hacia el actor raíz y el balance de cargas para diferentes densidades. Para llevar a cabo este análisis se utilizó únicamente la herramienta MATLAB, dejando de lado las métricas de energía y retardo evaluadas a través de OPNET.

### VI.3.3.1. Topologías de red.

A continuación se presenta un ejemplo de la topología inicial, después del despliegue aleatorio de los nodos, y la topología resultante después de aplicar el mecanismo de coordinación propuesto, para una densidad de  $D_{ATx} = 30 n/A_{Tx}$ . En las figuras que se muestran a continuación, los nodos sensores están representados por círculos azules y los actores por triángulos rojos. Por su parte, las líneas indican la asociación de un sensor hacia su actor raíz.

En la Figura 39 se aprecian sensores lejanos al actor raíz, lo que implica que algunos de éstos se localicen a una distancia mayor a un salto del actor, y que además, exista una distribución desigual de nodos asociados para cada uno de los actores, como se resume en la Tabla XI. Lo anterior, provoca que los sensores más cercanos al actor raíz consuman mayor energía, debido a la retransmisión de paquetes provistos por nodos lejanos a su actor asociado.

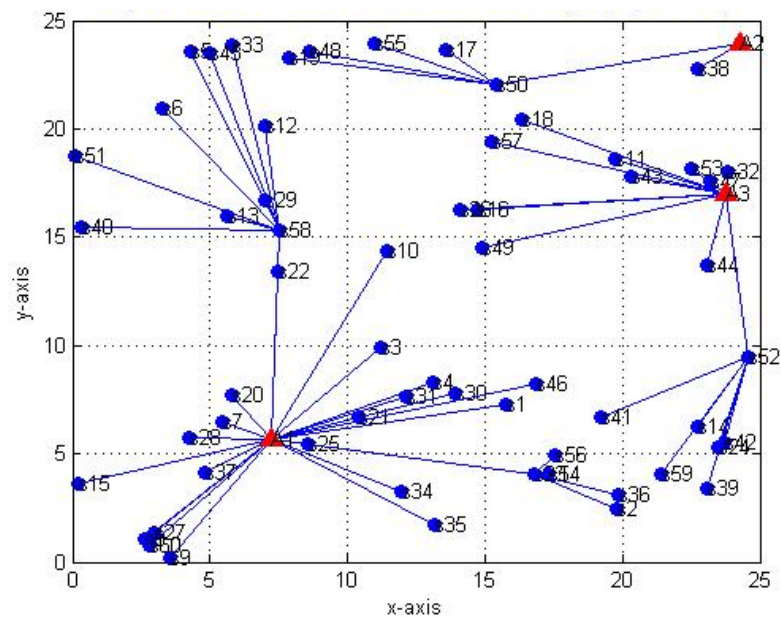


Figura 39. Asociación inicial de sensores con  $NS=60$ ,  $NA=3$  y  $D_{ATx}=30n/A_{Tx}$ .

Por otra parte, la Figura 40 muestra los árboles de distribución hacia los líderes de grupo o actores raíz formados después de aplicar la etapa de estimación de posición, en los cuales se aprecia una mejor distribución de los nodos con los actores asociados. Puede observarse que la mayoría de los nodos se encuentran a un salto de su actor asociado, logrando con ello disminuir el consumo de energía y retardo durante el reporte de un evento, además de extender la vida de la red, como se mostró en secciones anteriores.

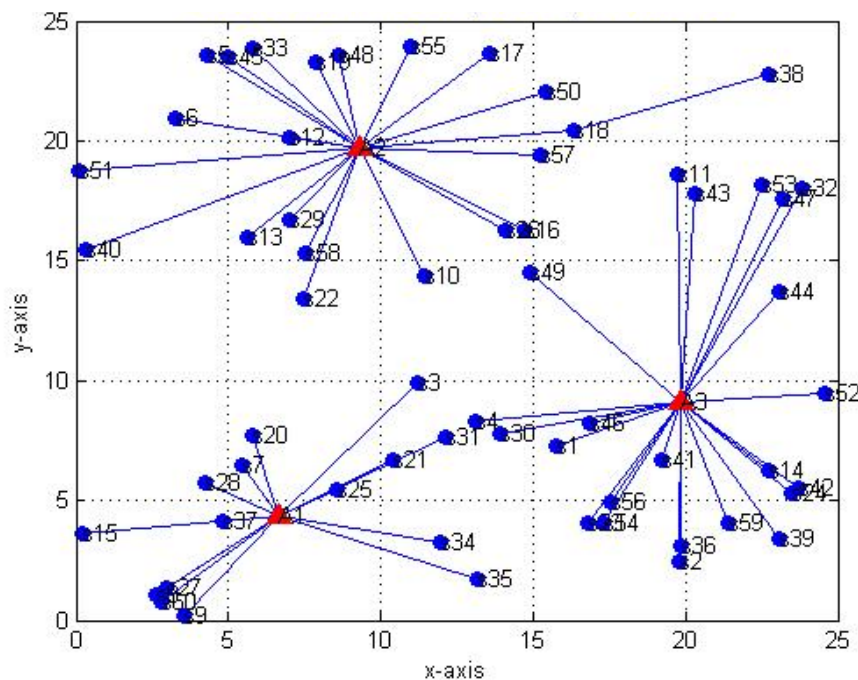


Figura 40. Asociación de sensores después de la etapa de estimación de posición de actores para escenario con  $N_S=60$ ,  $N_A=3$ ,  $r=10\text{m}$  y  $D_{ATX}=30n/A_{TX}$ .

Por último, la Figura 41 presenta la distribución final después de aplicar la etapa de balance de cargas, cuya distribución es muy similar a la de la etapa de estimación de posición de actores, sólo que en este caso existe una distribución equitativa en los nodos sensores asignados a cada actor.

En la Tabla XI se puede apreciar la distribución desproporcionada de los nodos sensores para cada uno de los actores (36, 6 y 18 nodos por actor) en la etapa de despliegue inicial de nodos, así como la suma total de las distancias de cada nodo a su actor raíz (525.56 m). Al posicionar los actores en los centros geométricos se aprecia una mejor distribución de los nodos en los actores (15, 22 y 23 nodos), con respecto al despliegue inicial y, por supuesto, una reducción del 33% en la distancia de nodos hacia el actor raíz. También se observa que la desviación estándar de la suma de distancias de los nodos miembros a su actor raíz disminuye de 129.6 m a 39.7 m, debido a que los actores se encuentran más cerca de sus nodos asociados. En cambio, en la etapa de balance de cargas, ésta se incrementa en un 2.4%, a cambio de una distribución equitativa de los nodos sensores, con el objetivo de reducir el consumo de energía de los nodos más cercanos al actor, encargados de la retransmisión de tráfico generado por los nodos que están más alejados del actor. Con el balance de cargas en cada actor se pretende homogeneizar la carga impuesta a estos nodos sensores y, de esta manera extender el tiempo de vida de la red.

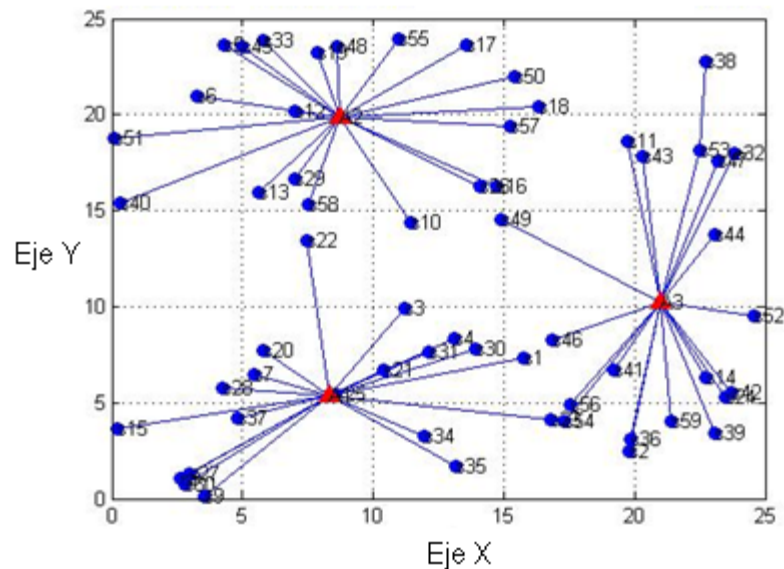


Figura 41. Árboles de distribución después de la etapa de balance de cargas para un escenario con  $N_S = 60$ ,  $N_A = 3$ ,  $r = 10\text{m}$  y  $D_{ATx} = 30 n/A_{Tx}$ .

Tabla XI. Resumen de parámetros para las etapas de estimación de posición y balance de cargas.

Etapa	Parámetro	Actor 1	Actor 2	Actor 3
Despliegue inicial	Nodos / actor	36	6	18
	Distancia al actor raíz	319	67.194	139.37
	Distancia total	525.564		
	Distancia Promedio	8.7594		
	Desviación estándar	129.668		
Estimación de posición (K-medias)	Nodos/ Actor	15	22	23
	Distancia al actor raíz	70.194	135.04	142.53
	Distancia total	347.764		
	Distancia Promedio	5.79		
	Desviación estándar	39.77		
Balance de cargas	Nodos/ Actor	20	20	20
	Distancia al actor raíz	110.15	114.57	131.96
	Distancia total	356.68		
	Distancia Promedio	5.94		
	Desviación estándar	11.52		

Finalmente, se midió el porcentaje de topologías que logran el balance de cargas en los actores. Para ello, se realizaron 100 simulaciones para 10 densidades diferentes, en un rango de  $D_{ATx} = 15$  a  $150 n/A_{Tx}$ , con incrementos de  $10 n/A_{Tx}$  y variando el número de actores ( $N_A = 2, 3$  y  $4$ ). La Figura 42 muestra el resultado obtenido, en la que se observa que para densidades de  $15 n/A_{Tx}$  con  $N_A = 4$  actores, el balance de cargas se logra en un 79%, y se incrementa para escenarios con mayor densidad de nodos. En cambio, para  $N_A = 2$  y  $3$  actores, el balance se obtiene para todas las densidades evaluadas, debido a que la cantidad de nodos que requieren ser reasignados aumenta a mayor número de actores en la red. Por otra parte, para densidades inferiores a  $15 n/A_{Tx}$  se presentan topologías con baja probabilidad de conectividad, provocando nodos aislados. Esto impide conocer la información de localización que la propuesta requiere para ejecutar los algoritmos de estimación de posición y balance de cargas. Por último

se observó que para escenarios con topología en rejilla, con los nodos equidistantes, se obtiene el balance de cargas para todas las densidades y número de actores.

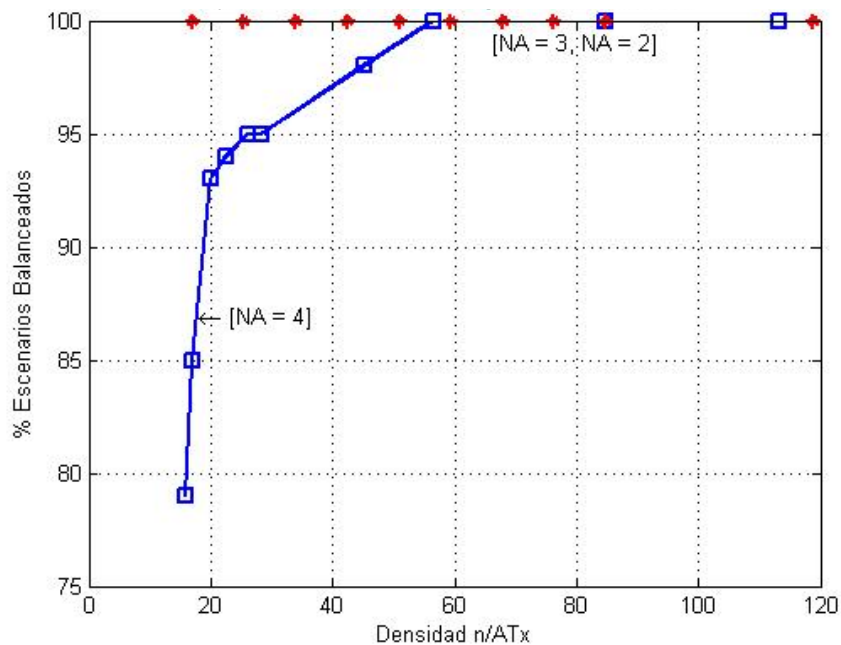


Figura 42. Porcentaje de escenarios balanceados para diferentes densidades ( $n/A_{Tx}$ ) y número de actores.

## VI.4. Resumen.

En este capítulo se presentaron los resultados del desempeño del mecanismo de coordinación propuesto. Las métricas que se emplearon para la evaluación del desempeño incluyen el consumo de energía, el retardo y la tasa de entrega de paquetes, para diferentes densidades de nodos en la red.

El mecanismo propuesto es independiente de la geometría del campo y la distribución de los nodos sensores. Los resultados de simulación muestran que el algoritmo K-medias, implementado en la etapa 2, usualmente logra balancear la



carga en escenarios que presentan una distribución homogénea de los nodos sensores. Por otro lado, un despliegue aleatorio de sensores requiere de la ejecución de una etapa adicional, llamada Balance Forzado (FB), para lograr balancear la carga en la red. Respecto al consumo de energía y el retardo durante el reporte del evento de los nodos sensores al sumidero, los resultados de simulación muestran que el mecanismo propuesto es capaz de reducir el consumo de energía y el retardo extremo-extremo con respecto a escenarios donde éste no se implementa.

## Capítulo VII

---

### Conclusiones

---

Este trabajo presenta una descripción de los procesos cooperativos que se llevan a cabo entre sensores y actores, como parte de la autoconfiguración en una red de tipo WSN, empleados para lograr sensado distribuido y ejecución de tareas acorde a los datos sensados. Una de las principales contribuciones de este trabajo es la propuesta de una Taxonomía de mecanismos de coordinación para arquitecturas WSN, bajo la cual se realizó un análisis comparativo de los mecanismos de coordinación más representativos publicados a la fecha.

Otra de las aportaciones es el diseño y validación a nivel de simulación de un mecanismo de coordinación para redes WSN. Éste opera en los niveles Sensor-Sensor y Sensor-Actor en los cuales se aplican los algoritmos de estimación de posición y balance de cargas. Con la propuesta se logra reducir el consumo de energía y el retardo extremo-extremo experimentado durante el reporte de un evento.

#### **VII.1. Discusión de Resultados.**

La Taxonomía propuesta está dividida en cuatro secciones: Arquitectura WSN, Procedimientos colaborativos, Criterios de desempeño y Requerimientos de la aplicación. Ésta, permitió analizar y clasificar las propuestas de mecanismos de coordinación, con el propósito de detectar ciertas áreas de oportunidad.

Recientemente se publicó una taxonomía para WSN propuesta por (Iyer *et ál.*, 2008), la cual tiene algunas semejanzas con la desarrollada en esta tesis; sin embargo, la primera se enfoca en redes WSN y fue publicada después de la propuesta incluida en esta tesis.

De los mecanismos de coordinación analizados se observa que de manera general, éstos dividen el área del evento y desarrollan una coordinación jerárquica empleando información de localización; esto con el objetivo de seleccionar los nodos apropiados (sensores y actores) que reaccionarán en respuesta a un evento específico en el menor tiempo posible. La aplicación de las propuestas difiere con respecto a la frecuencia del evento. Por ejemplo la propuesta A (Melodia, *et ál.*, 2005), uno de los primeros trabajos publicados, considera que los sensores y actores son fijos y que la frecuencia del evento es baja. Posteriormente, investigaciones relacionadas con WSN emigran a diferentes escenarios donde la frecuencia de los eventos se incrementa, mientras considera la posibilidad de múltiples eventos concurrentes, así como la movilidad de los actores, como la propuesta C. En general, los mecanismos de coordinación propuestos intentan cumplir con el soporte de requerimientos en tiempo real y el uso eficiente de energía en la red. Sin embargo, cabe resaltar que ninguno de los mecanismos de coordinación garantiza la seguridad de los datos y la robustez del sistema.

Uno de los principales requerimientos de las redes WSN está relacionado con el soporte de comunicación en tiempo real, el cual puede ser un requerimiento vital de la aplicación. Por lo tanto, un buen diseño de una arquitectura WSN debe proveer un uso eficiente de los recursos de red; como el consumo de energía. Consecuentemente, los mecanismos de coordinación propuestos para redes de tipo WSN deben ser capaces de responder al evento ejecutando acciones oportunas, mientras que al mismo tiempo intentan incrementar el tiempo de vida de la red. En este sentido y analizando los principales requerimientos y

restricciones impuestos por las redes de tipo WSN, se establecieron factores y criterios de diseño para el desarrollo de mecanismos de coordinación, los cuales sirvieron de guía para el desarrollo de uno propio, debido a que no existe consenso en la comunidad científica, acerca de cómo desarrollar este tipo de mecanismos.

En cuanto al mecanismo de coordinación propuesto, éste se distingue por emplear actores móviles y sensores fijos en una arquitectura automática. Forma grupos jerárquicos con los actores como líderes de grupo y utiliza información de localización de los nodos para estimar la posición más conveniente de los actores, además, balancea la carga en los actores en términos del número de nodos asociados.

Respecto a los resultados de simulación, se logró diseñar un mecanismo de coordinación a nivel Sensor-Sensor y Sensor-Actor, capaz de reportar oportunamente la información recolectada por los sensores durante la ocurrencia de un evento. Se utilizaron de manera eficiente los recursos disponibles de la red y se satisficieron los requerimientos de la red en cuanto a retardos y tasa de entrega de paquetes de datos, logrando una reducción del consumo de energía de aproximadamente el 38% del consumido por un modelo que excluye a la propuesta de esta tesis y que utiliza un solo actor. En cuanto a retardos de entrega de paquetes se redujo el tiempo a un 60%, respecto al modelo que utiliza un solo actor y que no emplea el mecanismo de coordinación. Por otra parte, utilizando tres actores, se observa que la diferencia en consumo de energía y retardo, al aplicar o no el mecanismo de coordinación propuesto, se incrementa conforme aumenta la densidad o el número de saltos hacia los actores.

La implementación de la propuesta se llevó a cabo a través del simulador de redes OPNET, utilizando nodos que soportan la plataforma IEEE 802.15.4 en capa Física y MAC. El modelo de simulación explota el modo sin Beacon habilitado en

capa MAC, que fue implementado como parte de este trabajo de tesis, así como la modificación del algoritmo de enrutamiento propuesto por (Gallardo López, *et ál.*, 2007) para operar con varios actores móviles.

## **VII.2. Contribuciones.**

A continuación se enlistan las principales contribuciones de este trabajo:

- Se propuso una Taxonomía para mecanismos de coordinación aplicado en escenarios con WSN (Ruiz Ibarra y Villaseñor González, 2009).
- Se realizó un análisis comparativo de cinco mecanismos de coordinación publicados en la literatura, aplicando la Taxonomía propuesta (Ruiz Ibarra y Villaseñor González, 2009).
- Se establecieron algunos elementos y criterios de diseño para el desarrollo de este tipo de sistemas (Ruiz Ibarra *et ál.*, 2007).
- Se especificó la estructura general del mecanismo de coordinación a diseñar acorde a la taxonomía propuesta.
- Se desarrolló en MATLAB un algoritmo para la estimación de posición de los actores en base al algoritmo K-medias.
- Se desarrolló en MATLAB un algoritmo para el balance de cargas en los actores.

- Se adaptó el algoritmo de enrutamiento multi-rutas propuesto por Gallardo López, J.R. *et. al.*, (2007) para operar con múltiples actores en un escenario WSAN bajo el estándar IEEE 802.15.4.
- Se diseñó e implementó en OPNET el mecanismo de coordinación propuesto en los niveles de Sensor-Sensor y Sensor-Actor y se comprobó su eficiencia en energía y retardo mediante simulaciones.
- Se modificó la etapa denominada *dra-closure* para operar con un modelo de canal por espacio libre con un radio de transmisión definido.

Por último, como parte de los resultados de este trabajo de investigación, se participó en dos congresos internacionales (Ruiz Ibarra *et ál.*, 2007), (Ruiz Ibarra y Villaseñor González, 2008), se publicó un capítulo de libro (Ruiz Ibarra y Villaseñor González, 2009), y dos artículos en revista indexada (Ruiz Ibarra y Villaseñor González, 2009), (Ruiz Ibarra *et ál.*, 2010), los cuales son descritos en el capítulo I.

### **VII.3. Trabajo Futuro.**

Del análisis comparativo presentado en la sección III.3 es claro que algunas de las funcionalidades descritas en la Taxonomía propuesta no son implementados. Una de estas funcionalidades está relacionada con el soporte de QoS. Algunos mecanismos de coordinación no proveen el soporte requerido para priorizar la ejecución de las tareas desarrolladas por los actores. De manera similar, algunas de las propuestas de mecanismos de coordinación analizadas no proveen los medios para ofrecer servicios diferenciados para mensajes de control y datos transmitidos en una WSAN.

Otro aspecto no abordado es la confiabilidad de la arquitectura propuesta, la cual incluye robustez y seguridad del sistema. La tecnología WSN provee una oportunidad para innovar que involucra retos únicos. Por ejemplo, el soporte de aplicaciones y servicios multimedia imponen grandes retos en el diseño de mecanismos de coordinación para redes de tipo WSN. El enrutamiento tolerante a fallas es una tarea crítica para la operación de WSN en ambientes dinámicos. Por otro lado, la rápida proliferación de redes inalámbricas y los nodos móviles han cambiado el escenario de la seguridad de la red. La tarea de proveer servicios de seguridad para redes de sensores inalámbricos no es una labor trivial debido a las limitantes de recursos de los nodos sensores. Como resultado, existe una necesidad relacionada con el desarrollo de nuevas arquitecturas y mecanismos para proteger la información en una WSN. Por lo tanto, debido a que las arquitecturas WSN se encuentran aún en sus primeras etapas de desarrollo, hay una oportunidad para diseñar arquitecturas, que consideren el soporte de QoS, la robustez y la seguridad. En este sentido, (Feng, 2008) examina y discute los requerimientos, retos y aspectos por resolver en QoS, para escenarios WSN. En relación a QoS, mecanismos tolerantes a fallas y seguridad, existen múltiples propuestas independientes como (Feng, *et ál.*, 2007; Xin-Ming *et ál.*, 2006 y Fei *et ál.*, 2007) entre otras; sin embargo, estas propuestas no han sido consideradas dentro de los mecanismos de coordinación desarrollados para WSN.

Para satisfacer los requerimientos de aplicación en tiempo y consumo de energía, los mecanismos de coordinación utilizan esquemas de agrupamiento, agregación de datos y algunos servicios adicionales, como control de potencia y localización. Sin embargo, éstos no emplean un diseño de inter-capas ("*cross-layer*") que pueda ser utilizado para reducir la sobrecarga en la red, permitiendo así, una reducción en consumo de energía y latencia. Modelo de inter-capas o *cross-layer* en inglés, se refiere al diseño de protocolos a través de la violación de comunicación de capas en la arquitectura de referencia, permitiendo la comunicación directa entre protocolos de capas no adyacentes, o compartiendo

variables entre capas. Por ejemplo, los servicios de agrupamiento, agregación y control de potencia involucran varias capas de la pila de protocolos y una solución eficiente puede ser un diseño inter-capas. No obstante, la mayoría de los esquemas propuestos se enfocan en unos cuantos aspectos, los cuales típicamente tratan de unir técnicas de enrutamiento y agregación de datos, pero ignoran aspectos de las capas física, MAC y aplicación. Por otro lado, la comunicación cooperativa exhibe varias formas de llevar a cabo la comunicación que involucra diferentes capas de protocolos e introduce muchas oportunidades para la optimización y diseño de inter-capas. Desde la perspectiva de comunicación cooperativa de la red, pueden beneficiarse no sólo los nodos involucrados, sino la red completa en muchos aspectos diferentes, como mayor diversidad espacial, caudal eficaz, adaptabilidad a las condiciones de la red, reducción de interferencia, transmisión a bajas potencias y menor retardo. Desde hace algunos años se ha visto un interés tremendo en la comunicación cooperativa, la mayoría en aspectos de capa física. Sin embargo, aún existen retos de investigación significativos (Pei, *et ál.*, 2006).

En relación a los protocolos de enrutamiento, muchos de ellos están basados en agrupamiento, los cuales directamente permiten la agregación de datos en el líder de grupo. Sin embargo, estos algoritmos funcionan bien en ambientes estáticos, donde la estructura del grupo se mantiene sin cambios durante largo tiempo, pero estas propuestas son frágiles al emplearse en ambientes más dinámicos, como lo es una red WSN con actores móviles. Con frecuencia el costo requerido para mantener la estructura jerárquica es considerable. Existen propuestas que han abordado este problema, entre las cuales se encuentra este trabajo de tesis. No obstante, aún se requieren esfuerzos para mantener la funcionalidad de la red bajo escenarios móviles (Fasolo, *et ál.*, 2007).

Otro aspecto que requiere ser atendido es la definición de métricas de desempeño estandarizadas, para evaluar y comparar la eficiencia entre diferentes mecanismos



de coordinación. No existe consenso en la comunidad en cómo diseñar, implementar y evaluar el desempeño de un mecanismo de coordinación. Como parte de este trabajo se establecieron criterios de diseño, que fueron de gran utilidad durante el desarrollo del mecanismo de coordinación propuesto. Sería conveniente estandarizar en toda la comunidad científica las métricas de desempeño y la metodología de diseño.

En cuanto al mecanismo de coordinación propuesto con los algoritmos de estimación de posición y balance de cargas en los actores, se logra reducir el consumo de energía y el retardo extremo-extremo, experimentado durante el reporte de un evento. A pesar de lo que se ha logrado, se requiere más trabajo de investigación para mejorar el desempeño de todos estos elementos. Éstos podrían incluir:

- **Energía residual de los nodos:** Los algoritmos de estimación de posición y balance de cargas sólo se basan en la información de posición de los nodos. Se considera importante incluir datos de la energía residual de los nodos para tener información más detallada de cómo realizar la formación de grupos, con el objeto de beneficiar a los nodos que poseen menos energía y lograr extender a un más el tiempo de vida de la red.
- **Coordinación a nivel Actor-Actor:** Este trabajo únicamente opera en los niveles de coordinación Sensor-Sensor y Sensor-Actor, por lo que es importante proponer un esquema de coordinación a nivel Actor-Actor, que establezca la comunicación entre actores y permita decidir qué hacer y cuáles actores deben reaccionar cuando surge un evento, y así evaluar el mecanismo en todos sus niveles de coordinación.
- **Propuesta inter-capas:** El diseño inter-capas permite utilizar información de diversas capas para mejorar la eficiencia de la red. La comunicación

entre los nodos inalámbricos está fuertemente influenciada por el medio físico, ya que la calidad de los canales radio varía con el tiempo. El tomar en cuenta las condiciones del medio físico, así como información que provee la capa MAC (información acerca del estado de las colas de paquetes en espera de servicio) al momento de ejecutar las etapas de estimación de posición y balance de cargas, permitirá seleccionar los enlaces que tengan las mejores condiciones, durante la formación de los árboles de distribución de los nodos sensores hacia su actor raíz.

## Bibliografía

---

- Agrologix website: <http://agrologix.com>. Consultado: Agosto, 2007.
- Ahuja R. K., Magnanti T. L., y Orlin J. B. 1993. *Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications*. Prentice Hall. Primera edición. New Jersey, EUA. 864 pp.
- Akyildiz, I.F., Su, W., Sankarasubramaniam y Cayirci, E. 2002. *A survey on sensor networks*. IEEE Communications Magazine. 40 (8): 102-114p.
- Akyildiz I.F y Kasimoglu I.H. 2004. *Wireless sensor and actor networks: Research Challenges*. Broadband and Wireless Networking Ad Hoc Networks Journal. 2(4): 351–367p.
- Centro para la Integración de la Innovación Tecnológica: <http://www.ceni2t.org>. Consultado: Agosto, 2007.
- Chong, C.Y y Kumar, S.P. 2003. *Sensor networks: evolution, opportunities and challenges*. Proceedings of IEEE, 91(8): 1247-1256p.
- Coates M. 2005. *Evaluating Causal Relationships in Wireless Sensor/Actuator Networks*. IEEE Int. Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Proceedings of IEEE. (ICASSP '05). Philadelphia, EUA. 18-23 Marzo. 937-940p.
- CRUISE website: <http://www.ist-cruise.eu>. Consultado: Agosto, 2010.
- Culler, D., Estring, D. y Srivastava, M. 2004. *Overview of sensor networks*. IEEE Computer. 37(8): 41-49p.
- Dinh D.V., Vuong M.V., Nguyen H.P y Nguyen H.X. 2005. *Wireless Sensor Actor Networks And Routing Performance Analysis*. International Workshop on Wireless Ad-hoc Networks. (IWWAN). Centre for Telecommunications Research. Londres UK. Mayo 23-26. 6pp.
- eSENSE IST website: <http://www.ist-esense.org>. Consultado: Agosto, 2010.

- Farinelli, A., Iocchi, L. y Nardi, D. 2004. *Multirobot Systems: A Classification Focused on Coordination Systems*. Man and Cybernetics, Part B, IEEE Transactions. 34 (5): 2015-2028p.
- Fasolo Elena y Rossi Michele, Widmer Jorg y Zorzi Michele. 2007. *Network Aggregation Techniques for Wireless Sensor Networks: A Survey*. IEEE Wireless Communications. 14(2): 70-87p.
- Fei Hu, Waqaas Siddiqui y Krishna Sankar. 2007. *Scalable Security in Wireless Sensor and Actuator Networks (WSANs): Integration re-keying with Routing*. Computer Networks, Elsevier: The International Journal of Computer and Telecommunications Networking. 51(1): 285-308p.
- Feng Xia, Yu-Chu Tian, Yanjun Li y Youxian. 2007. *Wireless Sensor/Actuator Network Design for Mobile Control Applications*. Sensors. 7(10): 2157-2173p.
- Feng Xia, 2008. QoS Challenges and Opportunities in Wireless Sensor/Actuator Networks. Sensors 8: 1099-1110p.
- Gallardo López, J. R., González Luque, A., Villaseñor González, L. A, y Sánchez García, J. 2007. *Multipath Routing Using Generalized Load Sharing For Wireless Sensor Networks*. Wireless and Optical Communications. Montreal, Canadá. Mayo 30 - Junio 1. 6pp.
- Gupta, P. y Kumar, P.R., 2000. *The capacity of wireless networks*. IEEE Transactions on information Theory. 46(2): 338-404p.
- Haidong Yuan, Huadong Ma, y Hongyu Liao. 2006. *Coordination Mechanism in Wireless Sensor and Actuator Networks*. First International Multi-Symposiums on Computer and Computational Sciences - (IMSCCS (2): 627-634p. Hangzhou, Zhejiang, China. Junio 20-24, 2006.
- Hu F., Cao X., Kumar S., y Sankar K. 2005. *Trustworthiness in Wireless Sensor and Actuator Networks: Toward Low-complexity Reliability and Security*. IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM). San Luis Missouri EUA. Noviembre 28-Diciembre 2. 3: 5pp.
- *IEEE Standard 802.15.4, <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.4-2003.pdf>. Consultado: Agosto, 2010.*

- Iyer Aravind, Kulkarni Sunil S, Mhatre Vivek y Rosenberg Catherine P. 2008. *A Taxonomy-based approach to desing of large-scale sensor networks*. En: Yingshu Li, My T. Thai and Weili Wu (ed). *Wireless Sensor Networks and Application*. Springer US. 3-33p.
- Koubâa y M. Alves. 2006. *OPNET simulator for IEEE 802.15.4 protocol, release 1.0*, <http://www.open-zb.net/>. Consultado: Agosto, 2010.
- Lloyd, S. P. 1957. *Last square quantization in PCM*. Bell Telephone Laboratories Paper. Publicado en Journal mucho más tarde: Lloyd, S. P. (1982). "Least squares quantization in PCM". *IEEE Transactions on Information Theory* 28 (2): 129-137.
- Lou W. 2005. *An Efficient N-to-1 Multipath Routing Protocol in Wireless Sensor Networks*. Proceedings of IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems (MASS), Washington, DC. Noviembre 7. 672-680p.
- Melodia T., Pompili D., Gungor V.C, y Akyildiz I.F. 2005. *A distributed coordination framework for wireless sensor and actuator networks*. Proc. 6th ACM international symposium on mobile ad hoc networking and computing. Urbana-Champaign, IL, EUA. Mayo 25 – 27. 99-110p.
- Melodia T., Pompili D., y Akyildiz I.F. 2006. *A Communication Architecture for Mobile Wireless Sensor and Actor Networks*. In Proceeding of IEEE International Conference on Sensor, Mesh and Ad hoc Communications and Networks (SECON). Reston, VA, Septiembre 28-28. Vol. 1: 109-118p.
- Melodia T., Pompili D., Gungor V.C., y Akyildiz I.F. 2007. *Communication and Coordination in Wireless Sensor and Actor Networks*. *IEEE Transactions on Mobile Computing*. 6 (10): 1116-1129p.
- Ngai E. CH., Lyu M.R., y Liu J. 2006. *A Real Time Communication Framework for Wireless Sensor-Actor Networks*. IEEE Aerospace Conference. Big Sky, Montana, EUA, Marzo 2006. 9pp
- Okabe Atsuyuki, Boots Barry, Sugihara Kokichi, y Sung Nok Chiu. 2000. *Spatial Tessellations: Concepts and Applications of Voronoi Diagrams*. John Wiley & Sons. Segunda edición. New York. 657pp.
- OPNET Simulator. 2007. <http://www.opnet.com>. Consultado: Agosto, 2010.

- Pei Liu, Zhifeng Tao, Zinan Lin, Elza Erkip y Shivendra Panwar. 2006. *Cooperative Wireless Communications: A Cross-layer Approach*. IEEE Wireless Communications. 13(4): 84 – 92p
- Ruiz Ibarra Erica C, Villaseñor González Luis A, Santos Aquino Raúl. 2007. *Design Issues and Considerations for Coordination Mechanisms in Wireless Sensor and Actor Networks*. CERMA-07. Cuernavaca Morelos. Julio 25-28. 6pp.
- Ruiz Ibarra Erica C., Villaseñor González Luis A. 2008. *Cooperation Mechanism Taxonomy for Wireless Sensor and Actor Networks*. International Conference on Wireless Sensor and Actor Network (WSAN'08). Ottawa Canadá. Julio 14-15. 12pp.
- Ruiz Ibarra Erica C. y Villaseñor González Luis A. 2009. *Cooperation Mechanism Taxonomy for Wireless Sensor and Actor Networks*. Ad Hoc & Sensor Wireless Networks Journal. Vol. 7: 91-113.
- Ruiz Ibarra Erica C. y Villaseñor González Luis A. 2009. *Cooperation in Wireless Sensor and Actor Networks*. En: Yan Zhang, Hsiao Hwa C., Mohsen Guizani (ed). *Cooperative Wireless Communications*. Auerbach Publications, Taylor & Francis Group. Primera edición. Florida, EUA. 449-474p.
- Ruiz Ibarra Erica C., Villaseñor González Luis A., Gallardo López José R., Espinoza Ruiz Adolfo. 2010. *A Load-balance Clustering Mechanism based on Location-control for Wireless Sensor and Actor Networks (WSAN)*. IEICE Transactions on Communications Letter. Vol. E93-B, (11). 4pp.
- Salkham A., Cunningham R., Senart A., y Cahill V. 2006. *A Taxonomy of Collaborative Context-Aware Systems*. Workshop on Ubiquitous Mobile Information and Collaboration Systems (UMICS'06). Luxemburgo. Junio 5-9. 899-911p.
- Sameer Sundresh, Gul Agha, Kirill Mechitov, Woo Young Kim, y Young Min Kwon. 2003. *Coordination Services for Wireless Sensor Networks*. *International Workshop on Advanced Sensors, Structural Health Monitoring and Smart Structures*. 32(3 - 4): 315-327p.
- Santi Paolo. 2005. *Topology Control in Wireless Ad Hoc and Sensor Networks*. John Wiley & Sons. Primera edición. New York. 249pp.
- Shah G.A., Bozyigit M., Akan O.B., y Baykal B. 2006. *Real Time Coordination and Routing in Wireless Sensor and Actuator Networks*. Proc.

6th International Conference on Next Generation Teletra\_c and Wired/Wireless Advanced Networking (NEW2AN). Lecture Notes in Computer Science, 2006; Vol. 4003: 365-383p.

- Sing C.P., Vyas O.P., Tiwari, M. K. 2008. *Survey of Simulation in Sensor Networks*. Proceedings of the 2008 CIMCA. IEEE Computer Society. Vienna Austria. Diciembre 10-12. 867-872p.
- Sundaraman B., Buy U., y Kshemkalyani A. 2005. *Clock synchronization for wireless sensor networks: a survey*. Ad-Hoc Networks. Vol. 3: 281-323p.
- Ubilogix website: <http://www.ubilogix.com>. Consultado: Agosto, 2010.
- Vassis D., Kormentzas G. y Skianis C. 2006. *Performance evaluation of single and multi-channel actor to actor communication for wireless sensor actor networks*. Ad Hoc Networks, Elsevier Science. 4(4): 487-498p.
- Verdone R., Dardari D., Mazzini G., y Conti A. 2008. *Wireless Sensor and Actuator Networks, Technologies*. Analysis and Desing. Elsevier Ltd. Primera edición. London UK. 362 pp.
- WiSeNts website: <http://www.embedded-wisents.org>. Consultado: Agosto, 2010.
- Xin-Ming Huang, Jing Deng, Jing Ma y ZeyuWu. 2006. *Fault Tolerant Routing for Wireless Sensor Grid Networks*. Sensors Applications Symposium Proceedings of the IEEE. Volumen 304(27):66 – 70p. Suzhou, China. Febrero 7-9, 2006.
- Ye, W., Heidemann, J. y Estrin, D. 2002. *An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks*. In Proceeding of the IEEE INFOCOM, Vol 3, pp. 1567-1576p.
- ZigBee Alliance websites: <http://www.zigbee.org/>. Consultado: Agosto, 2010.