

TESIS DEFENDIDA POR  
**Silvia García Tobón**  
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ

---

Dr. Luis Armando Villaseñor González  
*Director del Comité*

---

Dr. Arturo Velázquez Ventura  
*Miembro del Comité*

---

Dr. José Antonio García Macías  
*Miembro del Comité*

---

Dra. María del Carmen Maya Sánchez  
*Coordinador del programa de posgrado en  
Ciencias en Electrónica y  
Telecomunicaciones*

---

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

11 de Diciembre de 2008

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



---

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

---

**ALGORITMO DE AGRUPAMIENTO EFICIENTE EN ENERGIA APLICADO EN REDES  
INALAMBRICAS DE SENSORES Y ACTORES (WSAN)**

TESIS

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

Presenta:

SILVIA GARCÍA TOBÓN

Ensenada, Baja California, México, Diciembre del 2008.

**RESUMEN** de la tesis que presenta **Silvia García Tobón**, como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS en ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES con orientación en Telecomunicaciones. Ensenada, Baja California. Diciembre de 2008.

## **ALGORITMO DE AGRUPAMIENTO EFICIENTE EN ENERGIA APLICADO EN REDES INALAMBRICAS DE SENSORES Y ACTORES (WSAN).**

Resumen aprobado por:

---

Dr. Luis Armando Villaseñor González  
Director de Tesis

Las redes inalámbricas de sensores y actores (WSAN, por sus siglas en inglés) permiten monitorear el mundo físico y desarrollar acciones oportunas en respuesta a la información que es recolectada y reportada por los sensores. El desafío fundamental de este tipo de redes consiste en extender el tiempo de vida de éstas mediante el uso de estrategias de comunicación que sean eficientes en el consumo de energía. Por otro lado, el procedimiento de comunicación cooperativa entre nodos sensores y actores se debe realizar con el menor retardo posible.

En este trabajo se propone un protocolo de agrupamiento para lograr la auto-organización de una red WSAN considerando una arquitectura automática. La topología de red WSAN consiste de varios nodos sensores, unos cuantos nodos actores y un solo nodo sumidero (o sink). El protocolo de agrupamiento se implementa en el nivel de coordinación Sensor-Sensor considerando un número fijo de grupos bien distribuidos en toda la red.

El protocolo de agrupamiento que se propone hace uso de una arquitectura de red jerárquica y escalable basada en la inteligencia de enjambres; en este caso se considera una colonia de hormigas para controlar el proceso dinámico de selección de los nodos cabeza de grupo (CH, por sus siglas en inglés) de manera distribuida. El algoritmo de agrupamiento se implementa utilizando el simulador de redes de datos llamado OPNET. El modelo del protocolo de agrupamiento hace uso de una capa de enlace de datos basada en el estándar IEEE 802.15.4. Como parte del trabajo se realizó la implementación de la capa MAC IEEE 802.15.4 en modo de operación sin Beacon habilitado y la interoperabilidad con una capa de red que utiliza un protocolo con enrutamiento multi-rutas. A partir de los resultados de simulación obtenidos, se muestra que la implementación de agrupamiento en redes WSAN contribuye a lograr un ahorro en el consumo de energía.

**Palabras clave:** Algoritmo de agrupamiento, Wireless Sensor and Actor Networks, eficiencia en energía, coordinación Sensor-Sensor y Sensor-Actor.

**ABSTRACT** of the thesis presented by **Silvia García Tobón** as a partial requirement to obtain the MASTER OF SCIENCE degree in ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS with orientation in Telecommunications. Ensenada, Baja California, Mexico. December 2008.

### **ENERGY EFFICIENT CLUSTERING ALGORITHM FOR APPLICATIONS USING WIRELESS SENSOR AND ACTOR NETWORKS (WSAN)**

Wireless sensor and actor networks (WSAN) are used to monitor the physical world and develop opportune actions in response to the information collected and reported by the sensor nodes. The key challenge in this kind of networks is extending the network lifetime by implementing an energy efficient communication strategy. On the other hand, the cooperative communication process between sensor and actor nodes must take place with the lowest possible delay.

In this work, a clustering protocol is proposed for the auto-configuration of a WSAN when considering an automatic architecture. The WSAN topology is composed of several sensor nodes, some actor nodes and one single sink node. The clustering protocol is implemented at the sensor-sensor coordination level and considers a fixed number of well-distributed groups in the entire network.

The proposed clustering algorithm is based on the swarm intelligence in order to achieve a hierarchical and scalable network architecture; in this case an ant colony is considered for controlling the dynamic process of selection of the Cluster Head (CH) nodes in a distributed way. The clustering algorithm is implemented and simulated using the OPNET network simulator. The model of the clustering algorithm makes use of a data link layer based on the IEEE 802.15.4 standard. The implementation of the IEEE 802.15.4 MAC layer with non beacon-enabled operating mode and the interoperability with a multi-route network layer protocol are part of this thesis work. The simulation results show that the implementation of a clustering mechanism in WSAN reduces the power consumption.

**Keywords:** Clustering algorithm, Wireless Sensor and Actor Networks, real-time communication, energy efficiency, sensor-sensor and sensor-actor coordination.

## **Dedicatorias**

Con mucho cariño dedico este trabajo a mis padres:

*Sergio García Fernández*

*María Tobón García*

A mis abuelitas:

*Elvira Fernández T.*

*Adalberto García T.*

*A mis hermanos*

## Agradecimientos

Hoy se cierra un capítulo más en mi vida, pero se abre otro en el libro de los sueños. El que fue forjado con los cuidados de mi madre y resguardado bajo la fortaleza de mi padre. Doy gracias a ustedes por el amor y apoyo que me han brindado siempre, por la vida, gracias.

Agradezco a mi director de tesis: **Dr. Luis Villaseñor González**, por su asesoramiento científico y por el tiempo que dedicó a resolver mis dudas.

Gracias a los miembros del comité de tesis, Dr. Arturo Velázquez Ventura, Dr. José Antonio García Macías y Dr. Jaime Sánchez García por las acertadas recomendaciones aportadas, para realizar este trabajo.

Agradezco a mis hermanos, especialmente a Vicky por apoyarme y motivarme a seguir adelante. Gracias, también a mi gran amiga, Rosalina por ser como mi hermana.

Agradezco a los grandes amigos de generación que encontré en Ensenada. Voy a recordar los momentos que compartimos de desvelo, de alegría, las reuniones en la party house's, la nereydiña, viridiña, oscariña, aldiña y no podía faltar la obediña. Gracias a Erica, Joel y don George por brindarme una gran amistad. Espero que pronto nos reunamos todos, en Puebla tienen su humilde casa, cuando quiera ahí llegan...

Sobre todo quiero agradecer a Dios por colocarme exactamente en el lugar que estoy y permitirme vivir este momento junto a todos ustedes.

Agradecimientos al CICESE y al Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones por haberme dado la oportunidad de superarme.

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para la realización de los estudios de Maestría.

# CONTENIDO

## Página

<b>Resumen en Español</b> .....	i
<b>Resumen en Ingles</b> .....	ii
<b>Dedicatorias</b> .....	iii
<b>Agradecimientos</b> .....	iv
<b>Lista de Figuras</b> .....	viii
<b>Lista de Tablas</b> .....	xi
<b>Capítulo I.Introducción</b> .....	1
I.1 Antecedentes.....	1
I.2 Planteamiento del Problema.....	2
I.3 Objetivos.....	3
I.4 Metodología de Investigación.....	4
I.5 Infraestructura Empleada.....	4
I.6 Contribuciones y Organización de la Tesis.....	5
<b>Capítulo II. Redes Inalámbricas de Sensores y Actores (WSAN)</b> .....	7
II.1 Introducción.....	7
II.2 Arquitectura en WSAN.....	8
II.3 Características principales de WSAN.....	10
II.3.1 Diferencia entre redes WSAN y redes Ad Hoc.....	13
II.3.1 Diferencia entre redes WSAN y redes WSN.....	14
II.4 Consideraciones y retos de una arquitectura de red WSAN.....	14
II.4.1 Problemas relacionados al manejo de energía en WSAN.....	14
II.4.2 Tiempo de vida de la red.....	15
II.5 Áreas de Aplicación en WSAN.....	18
II.6 Resumen del capítulo.....	20
<b>Capítulo III.Protocolos de Agrupamiento</b> .....	21
III.1 Trabajo Relacionado.....	21
III.1.1 Algoritmos de agrupamiento aplicados a redes WSN o Ad Hoc.....	22
III.1.1.1 Esquema De Agrupamiento Bio-Inspirado Para Redes WSN.....	24
III.1.2 Algoritmos de agrupamiento aplicados a WSAN.....	27
III.2 Resumen del Capítulo.....	29
<b>Capítulo IV. Mecanismo de Agrupamiento Eficiente en Energía aplicado en WSAN</b> .....	31
IV.1 Introducción.....	31
IV.2 Requerimientos de Diseño del Algoritmo de Agrupamiento.....	31
IV.3 Diseño del Algoritmo de Agrupamiento.....	32
IV.3.1 Fase de Inicialización del Algoritmo WS-ANT.....	33

## CONTENIDO (Continuación)

	<b>Página</b>
IV.3.2 Fase de Agrupamiento WS-ANT en la Coordinación SS.....	35
IV.3.3 Fase De Recolección Y Transmisión De Datos.....	38
IV.4 Modelo de Simulación en OPNET .....	40
IV.4.1 Modelo de Simulación del Algoritmo de Agrupamiento WS-ANT Aplicado en una Red WSAN.....	42
IV.4.1.1 Modelo de Nodo .....	42
IV.4.2.2 Módulo Battery.....	44
IV.4.2.3 Capa Física .....	45
IV.4.2.4 Capa MAC.....	46
IV.4.2.5 Capa de RED.....	48
IV.4.2.6 Módulo De Agrupamiento.....	48
IV.4.2.7 Capa De Aplicación.....	52
IV.5 Resumen del Capítulo.....	53
<b>Capítulo V. Evaluación y Resultados de Simulación de WS-ANT para Redes WSAN.....</b>	<b>54</b>
V.1 Consideraciones De Simulación.....	54
V.2 Resultados de simulación.....	58
V.2.1 Resultados aplicando agrupamiento en la red WSAN.....	59
V.2.1.1 Formación de grupos en WSAN.....	67
V.3 Resumen del Capítulo.....	71
<b>Capítulo VI. Conclusiones y Trabajo Futuro.....</b>	<b>73</b>
VI.1 Discusión de Resultados .....	73
VI.2 Conclusiones y Aportaciones.....	74
VI.3 Trabajo Futuro .....	75
<b>Referencias Bibliográficas .....</b>	<b>77</b>
<b>Anexo A. El Estándar IEEE.802.15.4.....</b>	<b>80</b>
A.1 Componentes de Red.....	81
A.2 Topologías de Red.....	82
A.3 Capa Física IEEE 802.15.4 .....	84
A.4 Capa MAC IEEE 802.15.4.....	86
A.4.1 Modo Beacon habilitado y CSMA-CA Ranurado .....	87
A.4.1.1 Estructura de la supertrama.....	87
A.4.1.2 Mecanismo CSMA-CA ranurado .....	89
A.4.1.3 Modelo de transferencia de datos .....	91
A.4.2 Modo sin Beacon habilitado y CSMA-CA no Ranurado .....	93
A.4.2.1 Mecanismo CSMA-CA no Ranurado.....	93
A.4.2.1 Modelo de transferencia de datos .....	94

## **CONTENIDO (Continuación)**

### **Página**

<b>Anexo B. El Estándar IEEE.802.15.4 .....</b>	<b>96</b>
B.1 El Ambiente De Simulación En OPNET.....	96
B.2 Modelos Previos De Simulación En OPNET.....	101
B.2.1 Modelo De Simulación IEEE 802.15.4: Capas Física Y MAC .....	101
B.2.2 Modelo De Simulación IEEE 802.11: Capa De Red. ....	104

## Lista de Figuras

<i>Figura</i>	<i>Página</i>
Figura 1. Red WSN tradicional de un solo Sumidero.....	7
Figura 2. Arquitectura física de una red WSAN.....	8
Figura 3. Arquitectura de red WSAN: a) Semiautomática, b) Automática.....	9
Figura 4. Componentes de sensores y actores. ....	11
Figura 5. Pseudocódigo del algoritmo T-ANT para el procedimiento de envío de hormigas .....	25
Figura 6. Pseudocódigo del algoritmo T-ANT que incluye las fases, cluster setup y steady state.....	26
Figura 7. Fase de inicialización del algoritmo WS-ANT, a) en el nodo Sumidero y actor, b) en los nodos sensores.....	34
Figura 8. Fase de Agrupamiento WS-ANT para coordinación SS, a) Elección de nodo CH, b) Elección de grupo.....	37
Figura 9. Fase de Recolección y transmisión de datos.....	39
Figura 10. Modelo de nodo del Nodo Sensor v3.....	43
Figura 11. Modelo de nodo del Nodo Sensor con Agrupamiento.....	43
Figura 12. Modelo de procesos de módulo Battery.....	44
Figura 13. Parámetros del módulo Battery.....	45
Figura 14. Capa Física IEEE 802.15.4.....	45
Figura 15. Modelo de procesos de capa MAC en modo sin Beacon habilitado.....	47
Figura 16. Modelo de procesos de capa de red con algoritmo de enrutamiento multi- trayectorias.....	48
Figura 17. Modelo de procesos del algoritmo de agrupamiento WS-ANT para redes WSAN.....	49
Figura 18. Capa de aplicación del Nodo Sensor con Agrupamiento.....	52
Figura 19. Topología de red, usada en escenario de simulación.....	55

## Lista de Figuras

<i>Figura</i>	<i>Página</i>
Figura 20. Tiempo de vida de la red aplicando agrupamiento de sensores. ....	60
Figura 21. Consumo global de energía en la red, a) Energía consumida por todos los nodos, b) Energía promedio consumida por todos los nodos.....	61
Figura 22. Energía residual en cada nodo sensor en el tiempo.....	62
Figura 23. Energía residual de cada Nodo Sensor al finalizar el tiempo de vida de la red WSAN.....	62
Figura 24. Tráfico recibido en cada nodo Sensor, a) transmisión de datos sin desfase, b) transmisión de datos con desfase.....	63
Figura 25. Tráfico transmitido en cada nodo Sensor, a) transmisión de datos sin desfase, b) transmisión de datos con desfase.....	63
Figura 26. Tráfico enviado por todos los nodos sensores y tráfico recibido por el Actor....	64
Figura 27. Número promedio de paquetes de datos recibidos por el Actor.....	64
Figura 28. Retardo extremo a extremo del tráfico de información hasta llegar al Actor. ....	65
Figura 29. Retardo de acceso al medio en el mecanismo CSMA-CA.....	66
Figura 30. Carga de Control que recibe cada nodo.....	67
Figura 31. Carga de Control que transmite cada nodo, a) transmisión de datos sin desfase, b) transmisión de datos con desfase.....	67
Figura 32. Topología de agrupamiento de WS-ANT en las rondas 1, 2, 3 y 6.....	68
Figura 33. Topología de agrupamiento de WS-ANT en las rondas 10,13, 14 y 20.....	69
Figura 34. Comportamiento de elección de CHs en el tiempo.....	70
Figura 35. Comportamiento de elección de CHs al finalizar el tiempo de vida de la red WSAN.....	70
Figura 36. Tiempo de vida de la red, a) Aplicando agrupamiento, b) sin aplicar agrupamiento .....	71
Figura 37. Arquitectura de la pila de protocolos IEEE 802.15.4/Zigbee.....	81
Figura 38. Topologías de red: a) estrella, b) en árbol, c) malla.....	83

## Lista de Figuras

<i>Figura</i>	<i>Página</i>
Figura 39. Bandas de frecuencia de operación. ....	84
Figura 40. Estructura de Supertrama. ....	88
Figura 41. El algoritmo CSMA-CA ranurado .....	90
Figura 42. Transferencia de datos de un dispositivo de red hacia el Coordinador PAN-modo Beacon habilitado en topología estrella. ....	91
Figura 43. Transferencia de datos de un coordinador PAN hacia un dispositivo de red-modo Beacon habilitado en topología estrella. ....	92
Figura 44. El algoritmo CSMA-CA no ranurado .....	94
Figura 45. Transferencia de datos de un dispositivo de red hacia el Coordinador PAN-modo sin Beacon habilitado, en topología estrella .....	94
Figura 46. Transferencia de datos de un coordinador PAN hacia un dispositivo de red-modo sin Beacon habilitado en topología estrella .....	95
Figura 47. Jerarquía de diseño en OPNET. ....	97
Figura 48. Modelo de red en el Editor de proyectos.....	97
Figura 49. Modelo de nodo en OPNET .....	98
Figura 50. Ejemplo de un modelo de Procesos.....	100
Figura 51. Modelo de nodo y modelo de procesos de capa MAC del Nodo Sensor v1. ....	102
Figura 52. Modelo de nodo y modelo de procesos de capa MAC del Nodo Sensor v2. ....	104
Figura 53. Modelo de nodo y modelo de procesos de capa de red del Nodo Sensor IEEE 802.11 con algoritmo de enrutamiento por trayectorias múltiples. ....	105

## Lista de Tablas

<i>Tabla</i>	<b>Página</b>
Tabla I. Aplicaciones de WSN.....	19
Tabla II. Tabla de vecinos.....	59
Tabla III. Bandas de frecuencia y velocidades de datos.....	85
Tabla IV. Módulos del editor de nodo.....	99
Tabla V. Especificaciones del dispositivo MICAZ.....	103

# Capítulo I

---

## Introducción

---

### I.1 Antecedentes

En la actualidad, las redes inalámbricas de sensores y actores (WSN, Wireless Sensor Networks, por sus siglas en inglés) gozan de un gran interés por parte no sólo de la comunidad científica sino también del mundo empresarial. El desarrollo de este tipo de redes plantea nuevos problemas en ingeniería de software y hardware, pero a su vez acerca más a la realidad escenarios que antes se pensaron como ciencia ficción.

Las redes de sensores se han hecho realidad al converger la tecnología de los sistemas microelectrónico-mecánicos, las comunicaciones inalámbricas y la electrónica digital (Puigjaner, 2004). Esto ha generado un incremento en el número, la escala y complejidad de las redes WSN existentes (Akyildiz, et al, 2002). Las redes inalámbricas de sensores están compuestas por nodos sensores y un nodo sumidero. En esta arquitectura de red, los nodos sensores son dispositivos pasivos que sólo recolectan datos de manera local y el sumidero de manera global, es decir, recolecta información de toda la red y no interactúa en el ambiente para modificarlo de acuerdo a la información obtenida. En este caso se requiere de personal humano para revisar los datos recolectados en el sumidero y ejecutar acciones en respuesta a tal información. La necesidad de WSN de garantizar una rápida respuesta a los nodos sensores de manera automática, ha permitido el desarrollo de las redes inalámbricas de sensores y actores (Wireless Sensor and Actor Networks - WSANs) las cuales representan una importante extensión de las WSN (Vassiss, 2005), dicha extensión no puede tomarse de manera simple desde el punto de vista de protocolos de comunicación (Verdone R., et al., 2008).

Las redes WSANs presentan un nuevo paradigma basado en el esfuerzo colaborativo de un gran número de sensores desplegados cerca o dentro del fenómeno a ser observado, lo que permite proveer diversos servicios para numerosas aplicaciones. Esta nueva arquitectura de red puede ser aplicada a una variedad de aplicaciones comerciales, científicas y militares como lo son el monitoreo ambiental, sensado y mantenimiento en plantas industriales, vigilancia militar, sensado medico, entre muchas otras nuevas aplicaciones. Además las tecnologías desarrolladas pueden ser aplicadas también a industrias aeroespaciales.

Los elementos necesarios para conformar las WSN y WSAN se encuentran ya disponibles comercialmente. Por lo tanto, ya se están aplicando 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 permite, con base en el patrón de movilidad, cuando dichos animales están en época reproductiva.

La implementación de WSAN requiere esfuerzos en investigaciones especialmente en el consumo eficiente de energía para protocolos de comunicación escalables para redes inalámbricas ad hoc, debido a los requerimientos de las aplicaciones y a las limitantes de la misma red (Coates, 2005). Con la finalidad de garantizar la escalabilidad y la eficiencia en energía, se han propuesto varias soluciones (Heinzelman, 2002), (Younis O y Fahmy S., 2004), (Mhatre, et al., 2005) y (Kuhn y Wattenhofer, 2004) que se basan en dividir la red de sensores en diferentes grupos (o clusters). La mayoría de los algoritmos de agrupamiento existentes pueden ser clasificados como dependientes de la topología, esto es, los grupos son predeterminados dependiendo de la topología de la red de sensores y puede ser reconfigurada de manera dinámica para manejar la movilidad y las fallas de los nodos sensores.

## **I.2 Planteamiento del Problema**

Debido a la característica única de requerimientos y coordinación en tiempo real de las WSAN, entre otras limitantes, y a pesar de que en años recientes se han propuesto una diversidad de protocolos y algoritmos para redes inalámbricas ad hoc y de sensores, dichos

protocolos no pueden ser utilizados en WSN. Una red WSN no puede ser considerada como una red WSN debido a la existencia de los nodos actores, ni como una MANET (Mobile ad hoc Network, por sus siglas en inglés) debido principalmente, a la presencia de nodos sensores limitados en energía y capacidades de cómputo que no hay en las redes ad hoc o MANETs. La movilidad también es un parámetro que influye en que las redes WSN sean tratadas a parte. Éste parámetro no es tan crítico o indispensable en los nodos sensores, razón por la cual los protocolos de comunicación usados en redes MANETs no pueden aplicarse a redes WSN y WSN.

Los protocolos diseñados para redes ad hoc o WSN, no consideran la interacción entre sensores y actores. Otro punto importante, es el problema de comunicación en tiempo real, el cual es trascendental en algunas aplicaciones de WSN, puesto que las acciones deben de realizarse lo más pronto posible después de que ocurre un evento. En este último caso el tiempo de respuesta por parte de los nodos Actores dependerá (o será más crítico) de acuerdo al tipo de aplicación. Por lo tanto se requiere de nuevos protocolos de comunicación que coordinen a sensores y actores para lograr una comunicación confiable, eficiente en energía y que satisfagan los límites de retardo definidos por la aplicación.

### **I.3 Objetivos**

El objetivo general de este proyecto de tesis es adaptar un mecanismo de agrupamiento para una red inalámbrica de sensores y actores con el propósito de lograr una comunicación eficiente en energía entre sensores y actores y con esto extender el tiempo de vida de la red.

Los objetivos particulares incluyen:

- Estudiar y analizar diferentes mecanismos de agrupamiento para redes WSN y WSN.
- Proponer el diseño de un algoritmo de agrupamiento para adaptarlo en un ambiente WSN.
- Implementar el algoritmo de agrupamiento en una red WSN utilizando el simulador de redes, OPNET. Usando la plataforma del estándar IEEE.802.15.4

- Evaluar desempeño del algoritmo de agrupamiento propuesto para WSAN considerando diferentes métricas.

## **I.4 Metodología de Investigación**

La metodología de investigación que se siguió en este trabajo de tesis, incluye los siguientes puntos:

- Se realizó investigación sobre el estado del arte en técnicas de agrupamiento aplicados en redes WSAN. La mayoría de los trabajos que se estudiaron y analizaron fueron propuestas para redes WSN, ad hoc y MANETS. La investigación se realizó para conocer las características, requisitos y consideraciones de diseño de los protocolos de agrupamiento para redes WSAN, también se aprovechó para poder encontrar ventajas y debilidades en el diseño de los algoritmos estudiados.
- En base al estudio de la literatura, se tomó como referencia un algoritmo de agrupamiento diseñado para redes WNS.
- Se procedió a la adaptación del algoritmo de agrupamiento aplicado a una arquitectura de red WSAN, en base al esquema de agrupamiento seleccionado.
- Se realizó la implementación del modelo de simulación en OPNET, usando la plataforma IEEE 802.15.4
- Por último se realizó la evaluación y análisis de resultados

## **I.5 Infraestructura Empleada**

Para el desarrollo de este trabajo de tesis se contó con la siguiente infraestructura que permitió la simulación de una red inalámbrica de sensores y actores. La mayor parte fue proporcionada por el Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada (CICESE):

- Computadora portátil HP Pavilion dv6326us, procesador Dual-Core a 1.73 GHz, 1 GB de RAM y 120 GB de disco duro, con sistema operativo Windows XP SP2.

- Computadora DELL Dimension E520, Pentium D, 2 GB en RAM y 160 GB en Disco duro, con sistema operativo Windows XP SP2.
- Conexión a Internet.
- Bibliotecas del CICESE y UNAM.
- Simulador de redes OPNET v14.5.A

## **I.6 Contribuciones y Organización de la Tesis**

La principal contribución de este trabajo es la adaptación de un algoritmo de agrupamiento dinámico, escalable, eficiente en tiempo y energía aplicado en un ambiente WSN e implementado en OPNET. El modelo de simulación se basa en el estándar IEEE 802.15.4 en capas inferiores y hace uso del modo de operación sin Beacon habilitado que se implementó como parte de este trabajo de tesis. En capa de red se utilizó un algoritmo de enrutamiento que hace uso de trayectorias múltiples.

Algunas de las limitaciones de este trabajo de tesis: El modelo de simulación implementado, no realiza agregación de datos, sólo se propone la idea general de cómo hacer esto. Otra limitación, se centra en el diseño del algoritmo de agrupamiento propuesto en este trabajo, no considera el diseño de un mecanismo de coordinación en el nivel Actor-Actor.

El resto del escrito está organizado de la siguiente manera:

En el capítulo II se describe la arquitectura de las redes inalámbricas de sensores y actores (WSAN), así como los requerimientos de éstas. Se describen algunas consideraciones y retos de las redes WSN, tal como la importancia del consumo de energía de manera eficiente, extender el tiempo de vida de la red, entre otras.

En el capítulo III se incluye el trabajo relacionado con el tema de agrupamiento de nodos, por lo que se mencionan algunas de las propuestas de mecanismos de agrupamiento más representativas. En particular se describe con detalle el algoritmo de una propuesta de agrupamiento biológicamente inspirado para su aplicación en redes WSNs, denominada T-ANT.

En el capítulo IV se presenta la propuesta de agrupamiento adaptada para una arquitectura de red WSAN tomando como base el trabajo previo para WSN y descrito en el capítulo III.

En el capítulo V se presenta la estructura del modelo de simulación para la propuesta de agrupamiento aplicada en WSAN.

En el capítulo VI se presentan los resultados de simulación obtenidos de la propuesta y las principales conclusiones del trabajo. Por último se hace una recomendación del trabajo futuro.

En el anexo A, se resume de manera general el estándar IEEE 802.15.4. Aquí se muestran algunos detalles de la capa física y capa de control de acceso al medio (MAC). Se describen los dos modos operacionales de la capa MAC IEEE 802.15.4.

El anexo B. presenta una introducción al ambiente de simulación OPNET, así como algunos modelos de simulación que fueron estudiados y manipulados para obtener el modelo de simulación en OPNET.

## Capítulo II

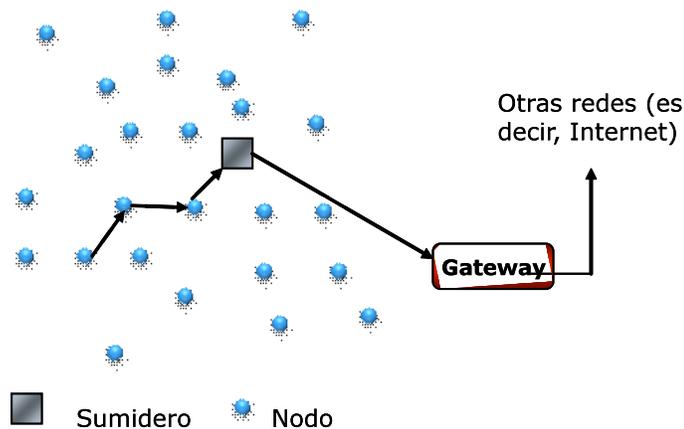
---

### Redes Inalámbricas de Sensores y Actores (WSAN)

---

#### II.1 Introducción

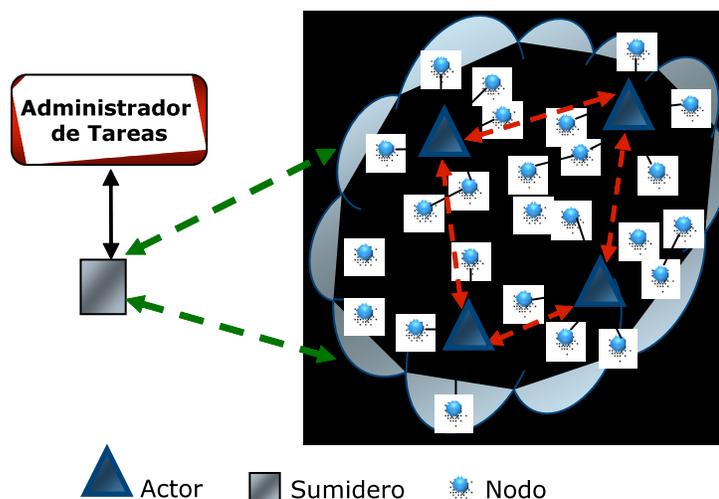
Las redes inalámbricas de sensores y actores (WSAN) se relacionan con las redes inalámbricas de sensores (WSN), ésta última en su forma más simple puede ser definida como una red de dispositivos denotados como sensores fijos o móviles que pueden sentir el ambiente y comunicar la información recolectada desde el campo monitoreado (un área o volumen) a través de enlaces inalámbricos. Los datos en WSN pueden ser enviados vía múltiples saltos hacia el sink (o sumidero), el cual puede conectarse a otras redes a través de un Gateway, ver Figura 1. Ambos, nodos sensores y sumidero pueden usar información de su localización geográfica a través de sistemas GPS (Global Positioning System) o técnicas de trilateración.



*Figura 1. Red WSN tradicional de un solo Sumidero*

En el caso de una arquitectura de red WSAN, ésta se compone de un grupo de nodos sensores y actores que se comunican por medios inalámbricos para desarrollar sensado distribuido y tareas específicas, de manera general una WSAN puede ser descrita como una red de nodos que cooperativamente sienten el ambiente y pueden controlarlo a través de la

realización de tareas por parte de los actores en respuesta a la información manejada por los nodos sensores, permitiendo la interacción entre personas o computadoras y el ambiente que lo rodea, ver arquitectura física de WSN en la Figura 2.



*Figura 2. Arquitectura física de una red WSN.*

## II.2 Arquitectura en WSN

En la Figura 2 se muestra la arquitectura física de WSN. En una arquitectura de red WSN los sensores recolectan información del mundo físico, mientras que los actores toman decisiones y desarrollan acciones apropiadas en el ambiente que permiten a los usuarios efectivamente sentir y actuar desde la distancia (Akyildiz y Kasimoglu, 2004).

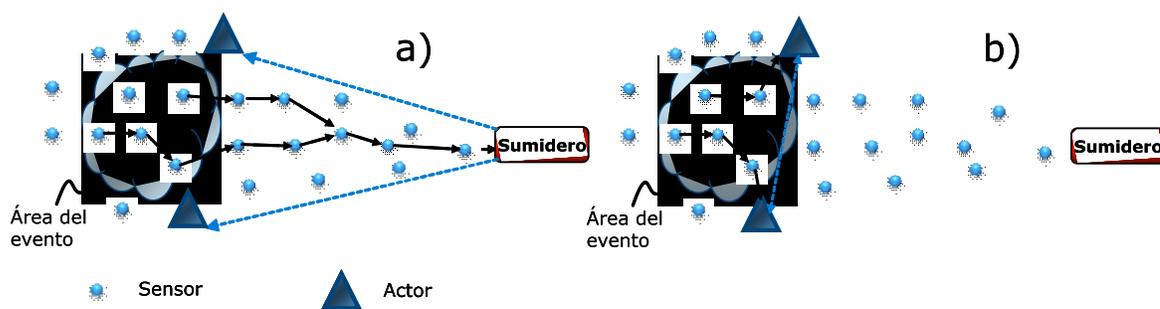
Por lo general, en una WSN se consideran dos tipos de arquitecturas para transmitir los datos recolectados por los sensores hacia los actores: *Arquitectura Automática* (AT) y *Semiautomática* (ST), tal como se muestra en la Figura 3.

En la *Arquitectura Automática*, los datos sensados son transmitidos directamente a los actores, los cuales procesan la información y se coordinan entre sí para realizar eficientemente la acción adecuada sin la colaboración del nodo sumidero (o sink). En esta arquitectura se tienen algunas ventajas respecto a la *Arquitectura Semiautomática*:

- *Baja latencia*: Debido a que la comunicación es directamente del sensor al actor, los cuales pueden encontrarse muy cercanos unos de otros.

- *Ahorro de recursos*: Debido a que la información del evento es transmitida localmente a través de los nodos sensores alrededor del área del evento, los sensores que se encuentran alejados del área del evento no operan como retransmisores, lo cual resulta en un ahorro de recursos de la red.
- *Mayor tiempo de vida de la red*: Debido al ahorro de recursos en la red.

Por su parte, en la *Arquitectura Semiautomática* los datos sensados son enviados primero al sumidero, quien recolecta los datos al igual que en WSN, los procesa y determina qué actores ejecutarán la tarea convenida, para ello el sumidero transmite los comandos de acción a los actores correspondientes (Cayirci, et al., 2005).



**Figura 3. Arquitectura de red WSN: a) Semiautomática, b) Automática**

Con respecto a la comunicación, existen dos posibilidades: comunicación a un solo salto o comunicación multi-saltos. La comunicación a un solo salto generalmente no es muy eficiente en una WSN debido a las largas distancias entre sensores y el sumidero, sin embargo, en una WSN puede no ser el caso debido a que los actores están más cerca de los sensores (Cayirci, et al., 2005).

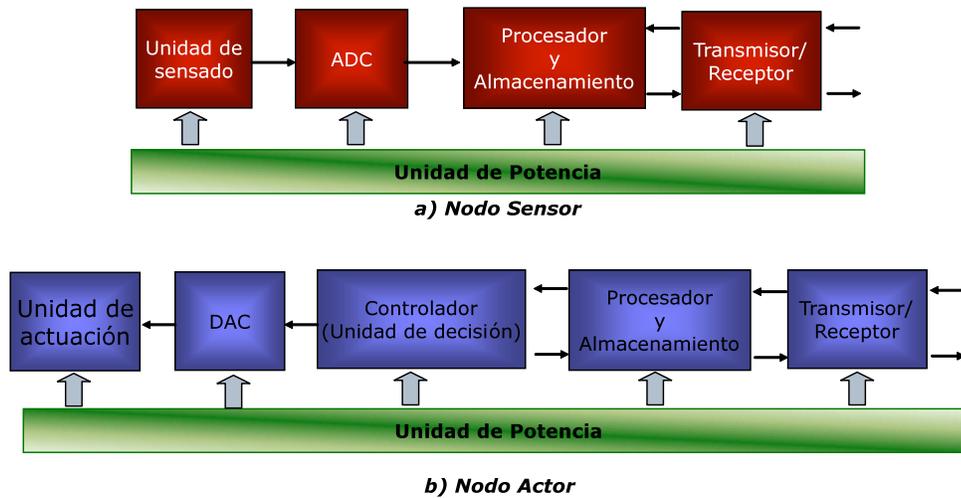
Puesto que los nodos sensores son dispositivos limitados en energía y los nodos actores realizan tareas en respuesta a los eventos sensados, la comunicación debe ser eficiente en energía y realizarse en tiempo real o con el menor retardo posible. De manera que debe establecerse un compromiso entre el retardo y el consumo de energía de los nodos, por lo que se definen mecanismos de coordinación que permitan asignar los recursos de manera óptima y responder en el menor tiempo posible. En una WSN el proceso de comunicación se realiza primordialmente del sensor al sumidero, mientras que en WSN el proceso de

comunicación puede ser más complejo. En este sentido en una WSAN se deben de considerar tres tipos de coordinación:

- La coordinación *Sensor-Sensor (SS)* que utiliza comunicación multi-salto entre nodos sensores para transmitir los datos sensados.
- La coordinación *Sensor-Actor (SA)* se usa para reportar nuevos eventos y transmitir las características de éstos desde del sensor al actor. También se considera como parte de la coordinación *SA* a la transmisión del enlace de bajada del actor al sensor utilizada para la configuración de los sensores.
- La coordinación *Actor-Actor (AA)*, utilizada para determinar la forma más apropiada de ejecutar una acción, indicando qué actores deben responder a cierta área de sensado. El objetivo de estos mecanismos es coordinar las acciones de los nodos en una WSAN con el fin de desarrollar acciones correctas en el tiempo oportuno.

### **II.3 Características principales de WSAN**

Los nodos sensores, al igual que en WSN (Wireless Sensor Networks) 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 monitorea algún parámetro de interés y lo traduce en una señal analógica, los datos analógicos coleccionados son convertidos en datos digitales por el ADC y entonces 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 comandos de acción como salidas. Los comandos de acción son convertidos a señales analógicas por el DAC y transformados en acciones mediante la unidad de actuación. La Figura 4 presenta un diagrama a bloques de los componentes de sensores y actores usados en una red WSAN.



**Figura 4. Componentes de sensores y actores.**

Los nodos sensores y actores son sistemas de elementos inalámbricos embebidos, cuyo hardware tiene cuatro partes importantes (Sanchez Laguna, 2006), que se describen a continuación:

- Constan de una unidad de sensado de componentes (sensores) capaces de monitorear condiciones físicas o ambientales tales como temperatura, sonido, vibración, presión, movimiento, humedad o detectar presencia humana, fuego entre otras. En algunos casos los nodos actores no cuentan con sensores de ningún tipo.
- Constan con dispositivos de comunicación inalámbrica que les permite enviar y recibir información para comunicarse con otros dispositivos dentro de su radio de cobertura. Esta cobertura generalmente es mayor en los nodos actores.
- Tienen con un controlador o CPU y memoria, esto permite ejecutar programas informáticos, para procesar o dar un tratamiento especial a los datos captados por los sensores o recibidos de otros nodos de acuerdo a los algoritmos utilizados en protocolos de enrutamiento, agrupamiento entre otros. Los nodos actores tienen capacidades más altas de procesamiento que los nodos sensores.
- Disponen de una unidad de potencia, es decir una fuente de alimentación que proporciona energía. Normalmente son baterías no recargables o difícilmente

sustituibles por lo que la energía es sin duda el recurso más preciados de estos dispositivos. Sin embargo los nodos actores tienen menos restricciones en energía.

Las características anteriores son referentes al equipo físico (hardware). En cuanto a características de manejo de comunicación en la arquitectura de red WSN, la escalabilidad con respecto al número de nodos en la red, autoorganización, auto-manejo, eficiencia en energía, un grado suficiente de conectividad entre nodos, baja complejidad, nodos de bajo costo y tamaño son todas características muy importantes de WSNs (Verdone R., et al., 2008). Estas características deben ser consideradas por los diseñadores de protocolos de comunicación. Algunas características se describen a continuación:

*Especificación de la aplicación:* Debido a que se pueden combinar los cálculos obtenidos de los diferentes dispositivos sensores (temperatura, presión, etc.), es posible lograr diferentes escenarios de aplicación, con redes de diferente densidad y despliegue de nodos, por lo cual se requiere de diferentes protocolos de comunicación o que sean adaptivos al ambiente.

*Interacción en el ambiente:* los nodos sensores interactúan con el ambiente a través del monitoreo del mismo y los actores interactúan en respuesta al monitoreo de los nodos sensores. Dependiendo de la aplicación y los protocolos de comunicación usados, el tráfico en una red puede ser muy diferente de otra. Estas redes tienen baja velocidad de datos y pueden operar sobre una escala de tiempo grande.

*Escalabilidad de la red:* los diseños en protocolos aplicados a WSN, deben ser capaces de trabajar con un gran número de nodos (cientos o miles) dependiendo de la aplicación.

*La densidad de la red:* la densidad de los nodos sensores define el nivel de cobertura del espacio monitoreado; sin embargo, también define el grado de conectividad, o alcanzabilidad de los nodos.

*Tolerancia a fallos.* Debido a la falta de energía algún o algunos nodos sensores pueden fallar en la comunicación. La falla puede deberse también, a daños físicos en los nodos debido al desgaste por uso o provocados por el medio ambiente. Sin embargo, el fallo de nodos sensores no debe comprometer el funcionamiento global de la red de sensores.

*Autoorganización:* Un aspecto importante en estas redes, es su capacidad para autoorganizarse. Los nodos se organizan de manera automática sin la necesidad de una gestión externa. Esto se debe a que las redes WSN y WSNAN son redes cuya topología no suele planificarse de antemano. La autoorganización es similar en redes ad hoc, pero la diferencia en el tráfico, manejo de energía, etc., requiere nuevas soluciones.

*Movilidad:* Son redes estacionarias o cuasi-estacionarias. Generalmente los nodos sensores son fijos y se dedican a sensar el ambiente en donde se encuentran, sin embargo puede requerirse de nodos sensores móviles en alguna aplicación. Los nodos actores por el contrario, son generalmente móviles y para alguna aplicación puede requerir de nodos actores fijos (que sólo roten sobre su propio eje, es decir, mantengan su posición, como una cámara de video, por ejemplo).

*Eficiencia en energía:* Se busca aplicar protocolos de comunicación que ayuden a que el consumo de energía sea balanceado en las redes WSNAN, debido a la restricción en energía de sus dispositivos sensores y al drenado de energía por parte de los actores cuando realizan tareas. La eficiencia en energía es importante, debido a que la batería de los nodos no es recargable y a la necesidad de prolongar su tiempo de vida que impacta en la arquitectura de red y del sistema.

### **II.3.1 Diferencia entre redes WSNAN y redes Ad Hoc**

Las redes inalámbricas ad hoc pueden formarse dinámicamente por un sistema autónomo de nodos conectados vía enlaces inalámbricos sin usar una red de infraestructura o un coordinador central. De acuerdo a la definición anterior una WSNAN está incluida en una red ad hoc; sin embargo, hay una distinción muy clara entre estos dos tipos de redes. Las redes inalámbricas ad hoc pueden no ser planeadas y altamente dinámicas, los nodos son terminales inteligentes (computadoras personales, PDA's, teléfonos celulares, impresoras, etc.), las aplicaciones típicas incluyen comunicaciones en tiempo real y no sensibles al tiempo, multimedia o voz. Cada nodo puede ser fuente o destino y todos pueden ser routers de otros nodos. En estas redes el tema más importante es la capacidad de procesamiento. Mientras que las redes WSNANs cuentan con dispositivos simples, pequeños (algunos del tamaño de una moneda) y de bajo costo; las aplicaciones típicas requieren del envío

periódico de pocos bytes, por alguna petición o cuando ocurre un evento. Todos los nodos pueden ser fuente o destino y no todos pueden jugar el papel de router ya que la energía es el parámetro más importante

### **II.3.1 Diferencia entre redes WSAN y redes WSN**

Las redes WSAN, como ya se ha mencionado son una extensión importante de las redes WSN, dicha extensión no es simple en cuanto a protocolos de comunicación. Las redes WSAN heredan características, ventajas y limitaciones de WSN, como las que se han mencionadazo en la sección II.3, pero adquieren nuevos retos.

Sin duda la característica más distintiva entre redes WSAN y WSN es la presencia de los nodos actores que tienen la capacidad de realizar físicamente una tarea en respuesta a la información monitoreada por los nodos sensores. Sin olvidar que los nodos actores cuentan con mayores capacidades en cuanto a energía, almacenamiento y procesamiento. La presencia de los nodos actores representa un desafío importante en cuanto a protocolos de comunicación que no tiene WSN.

La comunicación en una arquitectura de red WSAN requiere protocolos que contribuyan al ahorro de energía y a minimizar el tiempo en que los nodos sensores reportan eventos y los nodos actores reaccionan a éstos. Para lograr la eficiencia en energía y tiempo, en las redes WSAN pueden usarse diferentes protocolos o algoritmos en cada uno de los niveles de coordinación.

## **II.4 Consideraciones y retos de una arquitectura de red WSAN**

### **II.4.1 Problemas relacionados al manejo de energía en WSAN.**

La energía es un problema clave importante para la mayoría de las aplicaciones en WSAN, ya que el tiempo de vida de la red debe extenderse tanto como sea posible. Este tiempo en algunas publicaciones lo manejan como el tiempo en que comienza a funcionar la red hasta que uno de los nodos de la red termina su funcionamiento porque la batería no es capaz de proveer la energía necesaria para comunicación (Selvakennedy, et al., 2007). Por lo que el manejo de la energía en los nodos es un aspecto que debe cuidarse mucho.

Generalmente cuando el nodo transmite o recibe (el transceptor es la parte responsable para el consumo de energía) drena mucho más corriente de la batería que cuando el microprocesador, sensores o unidad de memoria están activos. La energía necesaria para transmitir es mayor que la necesaria para procesar un bit de información. Por esta razón los protocolos necesitan ser diseñados de acuerdo a paradigmas eficientes en energía, mientras que las tareas de procesamiento no. Por lo cual el diseño de protocolos eficientes en energía es un desafío muy particular de las redes WSNs.

#### **II.4.2 Tiempo de vida de la red**

La duración operacional de una red WSN después de su despliegue es un problema significativo. Normalmente los nodos sensores se dispersan en el área a monitorear o área de sensado y es deseable que puedan operar sin la necesidad de intercambiar las baterías de estos, o conservarlas el mayor tiempo posible. La energía de la batería se consume más cuando el nodo usa su transceptor de comunicación inalámbrica por más tiempo. Por lo cual, el tiempo de vida del nodo será más corto. Por lo tanto el drenado de batería depende del tipo de aplicación que se este estableciendo en la red WSN y la estrategia de comunicación de los datos.

La expiración de un nodo específico puede hacer que la red sea operacional o no, dependiendo de la tarea específica que se encuentre haciendo y la aplicación que se este ejecutando.

Para dar una definición del tiempo de vida de red, es necesario comprender antes, el tiempo de vida del nodo. Cuando la energía del nodo cae por debajo de un cierto umbral, este no es más capaz de trabajar apropiadamente y se dice entonces que el nodo no tiene la posibilidad de comunicarse con otros nodos. El consumo de energía debe calcularse en un nodo por la energía consumida en cada estado operacional (transmisión, recepción, sensado de canal, etc.) incluyendo el tiempo que estuvo en cada uno de esos estados.

De acuerdo al párrafo anterior se podría decir que el tiempo de vida del nodo se obtiene cuando la energía residual calculada llega a un cierto umbral. Sin embargo ese umbral no debe establecerse fijo ya que hay condiciones externas tales como temperatura que lo

pueden impactar. Las baterías son alteradas por efectos dinámicos, ya que una batería puede regenerar parte de la energía consumida durante periodos de inactividad. La energía consumida en un nodo no puede calcularse como la suma de energía gastada en diferentes estados, porque se debe considerar la energía necesaria para cambiar de un estado a otro. Sin embargo, en la mayoría de los casos el tiempo de vida del nodo se mide de acuerdo a una aproximación simple como se ha mencionado en el párrafo anterior, ya que la evaluación del tiempo de vida del nodo es mucho más compleja con modelados de efectos dinámicos.

El tiempo de vida de la red es un parámetro muy significativo. Su definición difiere en algunas literaturas, debido al tipo de aplicación y los protocolos de comunicación usados. A continuación se describen algunas definiciones de Tiempo de vida de la red:

**Definición 1.** *Tiempo de vida de la red:* Esta métrica representa el periodo de tiempo desde el instante en que la red es desplegada hasta el momento en que el primer nodo de la red se queda sin energía (Selvakennedy, et al., 2007)

**Definición 2.** *Tiempo de vida de la red:* se define como el intervalo de tiempo, desde que comienza la primera transmisión en la red inalámbrica hasta que el porcentaje de nodos (puede ser 100% o menor) que no ha terminado su energía residual llega a un umbral específico, el cual se define en función del tipo de aplicación (Verdone R., et al., 2008).

Si el porcentaje de nodos que operan de manera adecuada se establece a 100%, entonces, cuando el primer nodo en la red termine su batería, expirara también el tiempo de vida de la red. Esta definición no toma en cuenta el rol o tarea específica de los nodos cuando expiran. Si hay un nodo que no puede comunicarse con los demás porque su radio de transmisión no es suficiente para lograr conectividad y tal nodo expira, la red no sufre ningún cambio en su desempeño.

**Definición 3.** *Tiempo de vida de la red:* el intervalo de tiempo, desde que comienza la primera transmisión en la red inalámbrica hasta que el porcentaje de nodos (puede ser 100% o menor) aun alcanzables en la red por cualquier sumidero llega a un umbral específico, el cual se define en función del tipo de aplicación (Verdone R., et al., 2008).

En esta definición se consideran problemas de conectividad. Si un nodo que pertenece a un conjunto de nodos desconectados (sin poderse comunicar debido a que su radio de transmisión es pequeño, es decir no tiene nodos vecinos) expira, esto no provee contribuciones al deterioro del tiempo de vida. Sin embargo si hay un nodo que reenvía información recolectada de un grupo de nodos y este expira; entonces, el grupo de nodos completo permanece desconectado debido a esa expiración.

**Definición 4.** *Tiempo de vida de la red:* puede ser definido como un intervalo de tiempo, desde que ocurre la primera transmisión hasta que el porcentaje de nodos (puede ser 100% o menor) que reportan información, llega a un umbral específico. Ese umbral se define en función del tipo de aplicación (Verdone R., et al., 2008).

Esta definición considera además problemas de calidad de servicio (QoS por sus siglas en inglés) (en capas MAC y Red). Los nodos pueden expirar durante el transcurso del tiempo, se puede dar el caso de que algunos nodos que necesitan entregar sus datos hacia el sumidero a través de una ruta en la cual se incrementa la probabilidad de pérdidas. Dicha probabilidad crece conforme progresa el tiempo de la red. De acuerdo a esta definición, el tiempo de vida de la red obtenido es menor que el obtenido bajo las definiciones anteriores ya que cuando un solo nodo expira, puede provocar que los envíos de datos, sigan nuevas trayectorias y por lo tanto se incrementa el número de nodos involucrados en la transmisión del reporte.

**Definición 5.** *Tiempo de vida de la red:* puede definirse como el intervalo de tiempo, comenzando desde la primera transmisión en la red inalámbrica hasta que el error de estimación de proceso aleatorio espacial cae por debajo de un umbral específico, el cual se establece de acuerdo al tipo de aplicación (Verdone R., et al., 2008).

El error de estimación depende de la densidad de nodos y la uniformidad de su distribución espacial. Si los nodos expiran de manera no uniforme, el error de estimación llega a ser más grande con respecto al obtenido en un caso donde el mismo número de nodos que se encuentran distribuidos uniformemente en el área monitoreada. Esta definición es muy compleja para usarse a priori en la evaluación del desempeño de la red. Requiere una relación precisa entre localización de nodos y error de estimación de proceso aleatorio.

Independientemente de la definición del tiempo de vida de la red, éste dependerá del tiempo útil de las baterías de los nodos.

Es importante que el consumo de energía en la red sea de manera homogénea para aprovechar el funcionamiento adecuado de todos los nodos en la red. Por otro lado en redes WSN, a pesar de que los actores son nodos más ricos en recursos el orden de magnitud de energía requerida para acciones es más alto que el requerido para comunicación. De manera que no sólo es importante ahorrar la energía de los nodos sensores en cuanto a comunicación de información; sino además en la acción de los nodos actores. Para extender el tiempo de vida de la red WSN se necesita una adecuada coordinación Sensor-Sensor, Sensor-Actor y Actor-Actor para lograrlo.

## **II.5 Áreas de Aplicación en WSN**

Las redes de sensores y actores son una de las tecnologías más versátiles hoy en día, las cuales se pueden utilizar en una gran variedad de aplicaciones en diferentes áreas. Cada área puede tener varias aplicaciones y cada aplicación constar de varios procesos de monitoreo y acción, por ejemplo, en el área Casa y Oficina una aplicación puede ser automatización y monitoreo de un edificio que incluyen tareas como seguridad en acceso, monitoreo y control de clima o luz, entre otros. De manera general en una aplicación cada nodo puede hacer uso de uno o varios sensores para monitorear el ambiente (monitoreo ambiental, posicionamiento, rastreo) para proveer servicios. La Tabla I muestra algunas áreas y sus posibles aplicaciones o escenarios.

Para cada escenario o aplicación se debe considerar el objetivo de ésta; ¿quienes serán los usuarios?, ¿cuales son los requerimientos de los usuarios y en base a esto tomar decisiones técnicas?, como por ejemplo si el monitoreo o sensado será periódico y con que frecuencia.

Es importante aclarar que en WSN, el significado del término actor difiere de la notación convencional de actor, ya que un actor es un dispositivo que convierte una señal eléctrica de control en una acción física y constituye el mecanismo por el cual un agente actúa al ambiente físico. Un actor puede ser capaz además de actuar en el ambiente por medio de uno o varios actores, asimismo es una entidad de red que realiza funcionalidades

relacionadas a la comunicación (transmitir, recibir, procesar información y retransmitir datos recibidos).

**Tabla I. Aplicaciones de WSN.**

<b>Área de aplicación.</b>	<b>Aplicación o escenario</b>
Monitoreo ambiental	Detección de fuego forestal Detección de inundaciones Monitoreo volcánico Monitoreo de integridad estructural Glacsweb <sup>1</sup>
Cuidado de la salud	Asistente Nocturno Asistente de respaldo Monitoreo de pacientes estables Cuidado continuo
Rastreo y posicionamiento de animales	Sistema de posicionamiento en tiempo real
Entretenimiento	Humor virtual En el club nocturno
Logística	Rastreo usando RFID Rastreo en almacenes Administración en tiendas departamentales Almacenamiento inteligente
Transportación	Tráfico seguro
Casa y oficina	Casas inteligentes Edificios inteligentes
Aplicaciones industriales	Fabricas inteligentes Lista de compras inteligentes

---

<sup>1</sup> Es un proyecto con el objetivo de monitorear el comportamiento glaciario a través de diferentes sensores y comunicándolos con una web de recursos inteligentes, ver: <http://www.envisense.org>

## II.6 Resumen del capítulo

En este capítulo se ha descrito el marco teórico con los conceptos básicos y necesarios para guiar al lector a conocer las características principales de las redes WSAN. Se ha enfatizado en la importancia de conocer los niveles de coordinación en WSAN para obtener una comunicación eficiente en tiempo y energía.

En este capítulo se ha dejado ver que las redes WSAN son redes densas, compuestas de nodos con baterías no recargables, con baja movilidad, baja velocidad de transmisión y auto-configurables, como el caso de WSN. Sin embargo, las redes WSAN no pueden usar directamente protocolos diseñados para WSN.

El objetivo principal de esta tesis es adaptar un mecanismo de agrupamiento para redes inalámbricas de sensores y actores. El capítulo siguiente describe algunas propuestas de agrupamiento existentes en la literatura.

## Capítulo III

---

### Protocolos de Agrupamiento

---

El agrupamiento de nodos es una técnica efectiva para lograr extender el tiempo de vida de la red, la escalabilidad y el balance de carga, que son requerimientos para muchas aplicaciones en WSN (Younis y Fahmy, 2004). Varias de estas técnicas de agrupamiento han sido propuestas en diferente contexto, y el enfoque de interés ha sido en la eficiencia de energía en redes inalámbricas ad hoc y de sensores (Heinzelman, 2002), (Gupta y Younis, 2003), (Bandyopadhyay y Coyle, 2003), (Chiasserini, et al., 2004) y (Younis y Fahmy, 2004). En este sentido, la mayoría de las propuestas tratan de reducir el número de grupos, la distancia de transmisión y el número de nodos miembro en cada grupo, lo cual no siempre es bueno o no contribuye a lograr una mínima disipación de energía ya que el proceso de reducción del número de grupos puede consumir mayor energía debido al intercambio de mensajes de control requeridos como parte del proceso de agrupamiento. Los algoritmos de agrupamiento también se distinguen por la forma en que se realiza el proceso de selección de los nodos cabeza de grupo (CH, por sus siglas en inglés).

#### III.1 Trabajo Relacionado

A continuación se mostraran algunas de las propuestas de agrupamiento que han sido más ampliamente usadas.

De manera general, los algoritmos de agrupamiento organizan a la red en grupos de nodos. Cada grupo tiene un nodo cabeza de grupo o CH que puede hacer agregación o reducción de datos recolectados de sus vecinos con la finalidad de ahorrar energía. Los nodos CH s pueden enviar los datos vía multi-saltos a través de otros grupos o hacerlo directamente hacia el sumidero, en redes WSN.

### III.1.1 Algoritmos de agrupamiento aplicados a redes WSN o Ad Hoc

El algoritmo HCCA (Highest-Connectivity Clustering Algorithm) divide a la red considerando la conectividad de cada nodo, tiene baja tasa de cambio de CH y selecciona como CH al nodo con mayor número de vecinos (mayor conectividad); cuando hay nodos con el mismo número de vecinos entonces elige como CH al que tiene el identificador más bajo (Gerla y Tsai, 1995). Las cabezas de grupo son nodos concentradores de datos de sus nodos miembro por lo que la transferencia de datos hacia el sumidero requiere de mayor consumo de energía. HCCA provoca que dentro del vecindario, los nodos con identificador más bajo drenen más rápidamente su energía.

LIDCA (lowest-identifier clustering algorithm) sólo considera como CH al nodo con identificador más bajo entre sus vecinos (Kai y Jiandong, 2000) al igual que HCCA. Mientras que el algoritmo LCA (Linked Cluster Algorithm) elige al CH con el identificador más alto entre sus vecinos a un salto (Baker y Ephremides, 1981). En este caso, los nodos con ID más alto serán los nodos que drenen su energía más rápido que los demás.

Por otro lado, hay algoritmos orientados en maximizar el tiempo de vida de la red como la propuesta (Chiasserini, et al., 2004) en la que se propone variar el tamaño del grupo y el tiempo en que un nodo funciona como CH; también se considera que la localización de los nodos es conocida y que se conoce la topología completa de la red, lo cual no siempre es posible.

En (Shu, et al., 2005) se propone un algoritmo fijo que realiza balanceo de carga en energía, y considera la interacción entre agrupamiento y enrutamiento; para lograrlo se utilizan dos esquemas:

Esquema 1: encuentra el tamaño óptimo del grupo y su localización.

Esquema 2: se utiliza para elegir un CH probabilísticamente para que éste transmita el tráfico al siguiente-salto o lo entregue directamente al sumidero.

En el caso de LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy), el mecanismo de agrupamiento selecciona probabilísticamente a un nodo para llegar a ser CH (Heinzelman, 2002). Los nodos que son electos como cabeza de grupo colectan datos de otros nodos en

su vecindario y transfieren datos a la estación base. Este algoritmo de agrupamiento hace rotación de CHs, lo que permite distribuir el consumo de energía para lograr una operación más balanceada. LEECH considera que todos los nodos son capaces de alcanzar al sumidero directamente, pero se requiere conocer la posición de los nodos para desarrollar un control de potencia preciso. Asume que el consumo de energía es uniforme en todos los nodos CHs. LEECH no garantiza una buena distribución de cabezas de grupo en la red.

El mecanismo HEED (Hybrid Energy-Efficient Distributed) tiene como objetivo extender el tiempo de vida de la red. Por esta razón, la selección de nodos CHs se basa en la energía residual de cada nodo como parámetro principal. Este algoritmo de agrupamiento hace uso de una selección probabilística de un número tentativo de CHs (Younis y Fahmy, 2004). Como parte del algoritmo, el nodo advierte a sus vecinos de sus intenciones de ser CH, el mensaje utilizado incluye un costo secundario en función de la proximidad de sus vecinos o de la densidad del grupo. Este costo se utiliza para evitar que los CHs estén dentro del rango de otro, y para guiar a cada nodo miembro a seleccionar el mejor CH al cual unirse. HEED logra una mejor distribución de CHs. Sin embargo, el número de CHs se calcula de manera probabilística, lo que provoca que puede haber un número muy grande de grupos con pocos nodos o el caso contrario; pocos grupos con muchos nodos.

Se ha demostrado en diferente contexto que el comportamiento colectivo de insectos tiene características muy atractivas, sin embargo, hay muy pocas propuestas en WSN que han sido inspiradas natural o biológicamente. En (Genes, et al., 2002) proponen un algoritmo de enrutamiento para MANETs, basado en principios de colonias de hormigas. En este trabajo se explota el comportamiento que tienen las hormigas. Las hormigas dejan feromonas a lo largo de una ruta, ya que esta métrica proporciona un indicador de que tan bueno es un camino. Además, las hormigas establecen gradualmente el camino más corto entre la comida y su nido de una manera totalmente distribuida y autónoma. Los caminos más cortos tienen más feromonas y atraen a más hormigas. Los caminos largos no se pierden completamente. En la siguiente sección se describe una propuesta para el agrupamiento de sensores en un escenario WSN utilizando un algoritmo bio-inspirado.

### III.1.1.1 Esquema De Agrupamiento Bio-Inspirado Para Redes WSN

En (Selvakennedy, et al., 2007) proponen un algoritmo de agrupamiento biológicamente inspirado, denominado T-ANT, por medio del cual la red es agrupada al rededor de ciertos nodos considerados biológicamente atacados. Se usa un número fijo de agentes (el tamaño del enjambre o número de hormigas) para asegurar que un cierto número de grupos se forme a lo largo de la vida útil de la red. Este número se deriva analíticamente para minimizar la disipación de energía a través de la agregación de datos.

El tamaño óptimo de grupos considera una constelación de Voronoi que incorpora la influencia del tráfico interno y externo. El objetivo principal de diseño de T-ANT es formar un número óptimo de grupos con una buena distribución de CHs para lograr un balance de carga eficiente y un funcionamiento eficaz de la red en energía. Cada nodo se asocia a un cluster.

T-ANT es un protocolo de agrupamiento dinámico, de manera que su funcionamiento se divide en rondas. Cada ronda está compuesta por dos fases, denominada *cluster setup* y otra denominada *steady state*. Se utilizan varios temporizadores para controlar las operaciones para un desempeño óptimo. Los temporizadores más importantes son *CS\_Timer* (tiempo que tiene un nodo para fungir como CH), *JOIN\_Timer* (tiempo que un nodo tiene antes de decidir unirse a un grupo) y *DATA\_Timer* (intervalo de tiempo en la generación de datos sensados). Durante la fase *cluster setup*, se eligen CHs y se forman los Clusters alrededor de ellos. Se utilizan a los agentes sociales de una única manera para controlar la elección de CHs. Un nodo con una hormiga se vuelve un CH, mientras que los otros elegirían unirse al mejor cluster en un rango próximo (el mejor CH será aquel que este más cercano al nodo). Durante la fase *steady state*, se hace un proceso cíclico de colección de datos de los miembros, agregación de datos y transferencia al sumidero.

```

Algoritmo 1: Procedimiento de Envío de Hormigas
Sumidero:
  Repite
    elige a un vecino (nodo i) aleatoriamente para
    enviarle una hormiga
    envía la hormiga al nodo i
    espera ( $\tau + \text{rand}$ ), donde  $0 < \text{rand} < 1$ 
  Hasta que todas las hormigas son enviadas

Otros nodos:
If una hormiga viaja al nodo i
  decrementa TTL de hormiga
  If TTL > 0
    Elije aleatoriamente a un vecino j
    envía la hormiga al nodo j
  Elseif TTL = 0 y nodo i ya tiene una hormiga
    elije a un nodo aleatoriamente
    envía la hormiga
  Else
    almacena la hormiga
  End
End

```

**Figura 5. Pseudocódigo del algoritmo T-ANT para el procedimiento de envío de hormigas**

El algoritmo 1 de la Figura 5 muestra el pseudocódigo que se ejecuta durante la inicialización de la red. El sumidero suelta un número fijo de hormigas (es decir los mensajes de control) en la red, de acuerdo al número óptimo calculado. Los mensajes hormiga son enviados aleatoriamente hacia sus vecinos y viajan en la red tan profundo como lo restrinja el parámetro *TTL*, el cual es inicialmente puesto a un valor que corresponde a la mitad de la longitud de la diagonal del área geográfica (en saltos). Antes de soltar la próxima hormiga, el sumidero espera un tiempo proporcional al retardo a un salto ( $\tau$ ) más un tiempo aleatorio para asegurar que su siguiente transmisión no interfiera. Si el contador *TTL* expira, la hormiga permanece en este nodo. Sin embargo, si la última localización de la hormiga se traslapa con otra hormiga, la última hormiga debe encontrar una nueva localización. El algoritmo 1 no es parte de alguna ronda, sino a una fase de inicialización del algoritmo de agrupamiento que inicia el nodo sumidero.

**Algoritmo 2:** Algoritmo de Agrupamiento T-ANT

Cluster Setup:

**Cuando** *CS\_Timer* expira

**If** el nodo *i* tiene una hormiga  
condición *CH = verdadero*  
crea un mensaje *ADV (CH\_ID, TTL)*  
difunde el mensaje *ADV* a sus vecinos.

**Else**

El nodo *i* pone su *JOIN\_Timer* y espera por mensajes *ADV*.

**End**

**End**

**If** el nodo *i* recibe un mensaje *ADV* del CH *k*  
incrementa el número de mensajes Adv. Recibidos

**If** el nodo *i* no es un CH y el CH *k* es el más cercano  
selecciona al CH como el mejor CH

**End**

**End**

*/\*solo para nodos con ADV\*/*

**Cuando** *JOIN\_Timer* expira en el nodo *i*

calcula el nivel de feromonas, *p*  
crea un mensaje *JOIN (CH\_id, p)*  
envía *JOIN* al CH seleccionado.

**End**

**Algoritmo 2:** El Algoritmo de Agrupamiento T-ANT

Steady State:

**Cuando** *DATA\_Timer* expira en el nodo *i*

Captura el valor sentido, *val*

**If** el nodo *i* es un CH

Espera mensajes de datos de todos los miembros

Hace agregación de datos

Crea un mensaje de datos (*sink\_id, val*)

Envía al sink

**Else**

**If** el nodo *i* pertenece a un cluster

*/\*para nodos cubiertos\*/*

Crea un mensaje de datos (*CH\_id, val*)

Envía datos al CH

**Else**

*/\*para nodos no cubiertos\*/*

Crea un mensaje de datos (*sink\_id, val*)

Envía datos al sink

**End**

**End**

**End**

*/\* solo para nodos CH\*/*

**Cuando** *ANT\_Timer* expire

Elije al mejor vecino, *j*

Envía una hormiga al nodo *j*

**End**

**Figura 6. Pseudocódigo del algoritmo T-ANT que incluye las fases, cluster setup y steady state.**

El algoritmo 2 presenta el agrupamiento T-ANT global, es decir la ejecución de las dos fases (*cluster setup* y *steady state*) en cada ronda. Durante la fase *cluster setup* se decide la elección de CHs y formación de grupos, esta fase se activa a través del *CS\_Timer*, cuando este temporizador expira, un nodo verifica para ver si posee una hormiga, si la tiene, se volverá un CH. Debido a que hay un número fijo de hormigas en la red, se tiene que también existe un número fijo de CHs en la red.

Una vez que ha finalizado el proceso de selección de nodos CH, se procede a la etapa de formación de grupos (clusters). Cada CH procede a difundir un mensaje *ADV*, anunciando a sus vecinos que éste ha sido electo como CH. Al recibir tal mensaje, un nodo regular guarda el identificador de CH y el número de mensajes *ADV* recibidos, con lo que se afecta el nivel de feromonas en estos nodos. Y deciden unirse a un CH cuando su *JOIN\_Timer* expira, enviando un mensaje *JOIN* con su identificador, el identificador del CH

seleccionado y su nivel del feromonas que es calculado y basado en el número de CHs en su vecindario y su energía residual normalizada.

Cada CH al recibir mensajes de unión (JOIN), encuentra al nodo miembro con el nivel del feromonas más alto para atraer a su hormiga para la próxima ronda, que se iniciara cuando expire el siguiente *CS\_Timer*. Antes de que una hormiga deje su nodo actual, se pone una cantidad de anti-feromonas para imitar un decaimiento rápido del nivel de feromonas. Esto se hace para asegurar que las hormigas no regresen demasiado pronto al mismo nodo.

Durante la fase de *steady state*, se hace un proceso cíclico de colección de datos de los nodos. Cuando *DATA\_Timer* expira, todos los nodos capturan el valor sensado, crean un mensaje de datos y lo envía a su CH, en el caso de ser nodos cubiertos por un grupo. Se asume una red sincronizada, todos los nodos generan mensajes de datos simultáneamente para transmitirlos. La agregación de datos y transferencia al sumidero ocurre en intervalos fijos. Debido a la proximidad espacial de los nodos en un cluster, el CH realizará un proceso de agregación con pérdida de datos para aprovechar las posibles correlaciones espaciales más altas. Los nodos que no escuchen mensajes ADV durante la fase *cluster setup* (nodos no cubiertos por un grupo) buscarán transmitir sus datos hacia el sumidero, sin unirse a un grupo en particular.

### **III.1.2 Algoritmos de agrupamiento aplicados a WSN**

Con respecto a los mecanismos de coordinación para escenarios de WSN se puede encontrar muy poco trabajo publicado en la literatura. Recientemente se han propuesto y publicado algunos trabajos como (Melodia T., et al., 2005), (Ngai, et al., 2005), (Yuan, et al., 2006) y (Shah et al., 2006) en los que se implementa un algoritmo para realizar el agrupamiento de los nodos sensores; en (Ruiz Ibarra, Villaseñor González, 2008) se presenta un análisis y comparación de los diferentes mecanismos de coordinación utilizados en estas propuestas.

Durante la literatura, encontramos la propuesta (Melodia T., et al., 2005) proponen un modelo de coordinación Sensor-Actor que usa agrupamiento manejado por eventos, en el cual los clusters se forman cuando ocurre un evento para reaccionar óptimamente al evento

y proveer la fiabilidad requerida con el gasto mínimo de energía. Cuando ocurre un evento los nodos se coordinan entre sí para asociarse cada uno con un actor. Sin embargo en nuestra opinión, el hecho de que se formen los grupos bajo demanda, implica que el tiempo de respuesta al evento será mayor que en el caso que los grupos ya estuviesen formados al momento de reportar un evento, aunque el ahorro de energía puede estarse aprovechando al no tener que mantener o formar nuevos grupos y sobre todo por segmentar sólo el área del evento. Los eventos reactivos no son adecuados para escenarios en los que ocurren muchos eventos simultáneamente o la ocurrencia de estos es frecuente.

En (Ngai, et al., 2005) también usan el agrupamiento manejado por eventos, pero proponen un algoritmo de reporte de eventos, el cual divide el área del evento en piezas y transmite los datos sensados con una clasificación especial para reducir el tiempo de respuesta. Este trabajo propone mecanismos de coordinación en los tres niveles de coordinación. En la coordinación Actor-Actor, el algoritmo soporta Actores móviles. Utiliza protocolos de enrutamiento geográfico.

En (Yuan, et al., 2006) propone un modelo basado en una arquitectura jerárquica, con formación de grupos geográficos, dividiendo el área de acción en eventos en secciones fijas más pequeñas para distribuir de manera óptima la carga entre diferentes actuadores. Considera que los sensores son estacionarios y conocen su localización, mientras que los actuadores pueden ser móviles. Esta propuesta tiene aplicación en escenarios con múltiples eventos simultáneos o en la ocurrencia frecuente de eventos

En (Shah et al., 2006) se propone un esquema RCR (real-time coordination and routing) para redes WSN. Se dirige a la coordinación Sensor-Actor con entrega de paquetes en arquitectura automática y semiautomática. Para elegir al CH se basa en una ecuación de pesos, esto lo toma como referencia del trabajo realizado previamente en (Ramos y Merelo, 2002) y aplicado para redes móviles ad hoc. La desventaja en este trabajo es que usa demasiados mensajes de control, provocando sobrecarga en la red. Usa un algoritmo para agrupamiento y otro para enrutar paquetes en tiempo real hacia los actores o hacia el sink, según sea el caso.

- DAWC (Dynamic Weighted Clustering Algorithm): es un protocolo de agrupamiento heurístico usado para configurar dinámicamente los sensores en forma de cluster para lograr eficiencia de energía.
- DEAR (delay-constrained energy aware routing): entrega de paquetes en tiempo real.

Basados en estos trabajos se observa que el proceso de agrupamiento se puede clasificar como agrupamiento basado en eventos, agrupamiento geográfico y agrupamiento dinámico. En el agrupamiento basado en eventos, el proceso de formación de grupos es activado por un evento y los grupos son formados en ese momento. Sin embargo, este paradigma no es recomendado para escenarios donde ocurren múltiples eventos simultáneos o cuando la ocurrencia de eventos es frecuente. En el caso del agrupamiento geográfico, la formación de grupos se realiza al segmentar el área de acción en secciones más 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, el agrupamiento dinámico se adapta a la topología dinámica de la red: el procedimiento de formación de grupos no es periódico y está basado en ecuaciones de pesos las cuales establecen pesos para diferentes parámetros acorde a las necesidades de la aplicación.

### **III.2 Resumen del Capítulo.**

Hay algunas desventajas que nosotros identificamos en las propuestas mencionadas en este capítulo, esto debido a que están diseñadas para un tipo de red (ad hoc o WSN) o aplicación específica y que de acuerdo a eso eligen parámetros importantes como movilidad, conectividad, energía, retardo; además de no considerar la existencia de nodos actores, por lo que no es posible portar directamente estos algoritmos a una red WSN. También se ha comentado en este capítulo las consideraciones de diseño que identificamos no son adecuadas en cuanto al proceso de selección de cabezas de grupo, número de grupos formados, entre otras. Las consideraciones de diseño de los algoritmos descritos anteriormente nos sirvieron para seleccionar un algoritmo de agrupamiento con características que contribuyen a mejorar la eficiencia energética, para portarlo en una arquitectura WSN.

En cuanto a las propuestas para WSN, casi todas manejan formación de grupos en el nivel de coordinación Sensor-Actor, sin explorar el agrupamiento en Sensor-Sensor.

Por lo tanto la presente propuesta de tesis se enfoca en la adaptación de un mecanismo de agrupamiento para una red WSN, con la finalidad de establecer una comunicación efectiva y eficiente entre los diferentes nodos que componen la red, esta propuesta se describe a detalle en el capítulo IV.

## Capítulo IV

---

### **Mecanismo de Agrupamiento Eficiente en Energía aplicado en WSAN.**

---

#### **IV.1 Introducción**

En este trabajo se considera la implementación de un mecanismo bio-inspirado para la formación de los grupos dentro de una WSAN. Se ha tomado como referencia el trabajo realizado previamente en (Selvakennedy, et al., 2007) y descrito en el capítulo III. Este trabajo propone un algoritmo de agrupamiento dinámico, llamado T-ANT que es diseñado para operar en una red WSN. Por lo cual se deben considerar algunos problemas que surgen cuando se considera la implementación en una red WSAN. T-ANT fue seleccionado entre diferentes propuestas publicadas a la fecha durante la fase de de revisión bibliográfica de este trabajo de investigación. Tal selección se debe a que el protocolo T-ANT calcula el número óptimo de CHs que habría en la red, hace rotación de CHs (Cluster Heads) y permite una buena distribución de CHs en toda la red. El número de grupos se mantiene fijo durante el tiempo de vida de la red. T-ANT logra balance de carga y eficiencia en energía.

#### **IV.2 Requerimientos de Diseño del Algoritmo de Agrupamiento.**

Como consideración de diseño del algoritmo de agrupamiento aplicado a una arquitectura de red WSAN, este trabajo considera la implementación de una arquitectura WSAN automática, es decir el reporte de eventos por parte de los sensores se hará directamente hacia al actor al cual están asociados. Esta arquitectura se elige debido a las ventajas que representa en baja latencia y ahorro de energía como se menciona en el capítulo II. El diseño considera que los nodos sensores y actores son fijos, sin embargo se recomienda que

los actores sean móviles para emplear el algoritmo en redes con aplicaciones en las que el actor necesita trasladarse a algún punto en la red para realizar una tarea específica. Con respecto a la densidad de nodos en la red se considera que hay un número suficiente de nodos en la red para asegurar conectividad entre ellos. En cuanto a los tipos de coordinación, la propuesta de agrupamiento considera la formación de grupos en el nivel Sensor-Sensor y utiliza la coordinación Sensor-Actor para el envío de datos desde sensores hacia actores a través de multi-saltos.

Se considera que los actores tienen una posición adecuada u óptima dentro de la red, de manera que exista un balance de carga adecuada. También se considera que el sumidero tiene información sobre la topología de la red y que cada nodo sensor sabe a qué actor está asociado; este último requerimiento es necesario para evitar que los diferentes tipos de mensajes traspasen el área al que pertenece, problema que no se tiene en T-ANT para WSN.

### **IV.3 Diseño del Algoritmo de Agrupamiento**

Este trabajo de tesis adapta un algoritmo en el cual se forman grupos de nodos sensores que constan de un único nodo coordinador o cabeza de grupo (CHs) que es electo a través del uso de agentes biológicos (hormigas). El algoritmo de agrupamiento, es un algoritmo dinámico. Se entiende por dinámico al hecho de que los nodos comparten la tarea de ser CHs para lograr que el consumo de energía en la red sea de manera eficiente y con esto lograr extender el tiempo de vida de la red.

Llamamos a nuestro algoritmo WS-ANT. Su funcionamiento consta de rondas, donde cada ronda comprende de una fase de *Agrupamiento para coordinación SS* y de la fase de *Recolección y transmisión de datos*. La fase de *Agrupamiento para coordinación SS*, es la encargada de seleccionar a nodos CHs y formar grupos de nodos. El proceso de selección de los nodos CHs se basa en la transmisión de agentes o mensajes de control a los cuales se les denomina “hormigas” y que se propagan por la red. Un nodo que posee una hormiga deberá elegirse como cabeza de grupo e informarlo a sus nodos vecinos para que estos últimos decidan asociarse a un grupo y realizar envío de información de manera local. En la

fase de *Recolección y transmisión de datos*, los nodos sensores monitorean el ambiente y crean mensajes de datos que enviarán hacia su CH y éstos enrutarlos hacia el nodo actor.

El algoritmo de agrupamiento WS-ANT se basa principalmente en tres temporizadores para controlar su operación para un desempeño óptimo. Los temporizadores son *CS\_Timer* (tiempo que tiene un nodo para fungir como CH), *JOIN\_Timer* (tiempo que un nodo tiene antes de decidir unirse a un grupo) y *Timer* (temporizador usado para transmitir la hormiga, cuando un nodo CH dejará de realizar esa tarea).

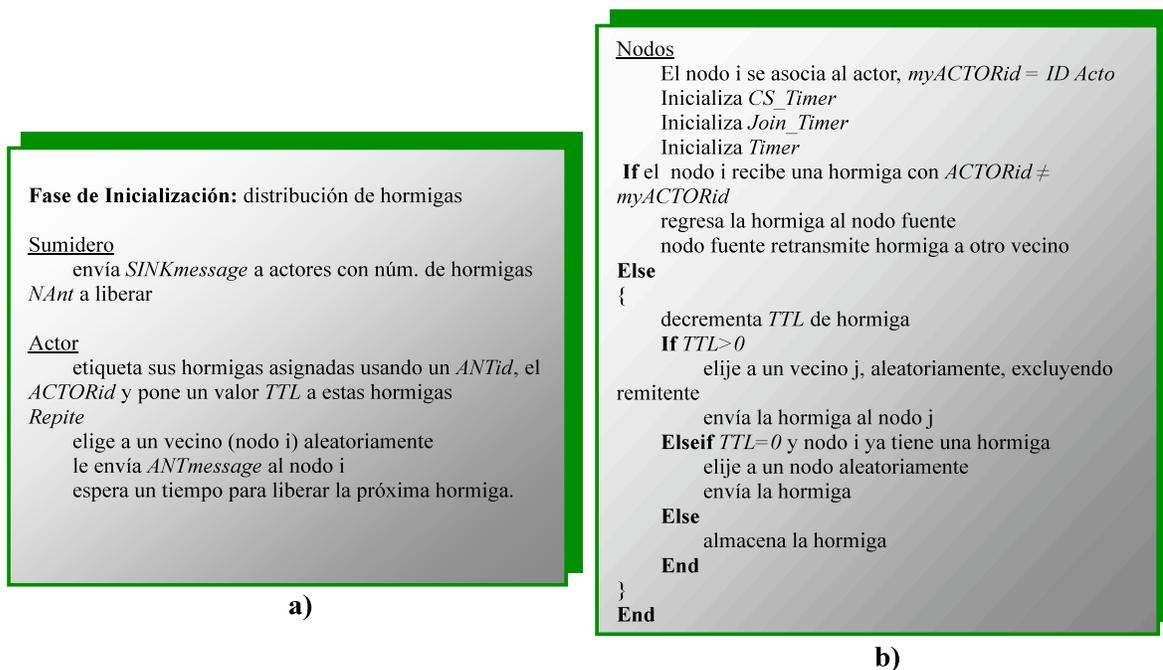
Como parte del proceso de comunicación se hace un intercambio de mensajes de control para lograr la formación de grupos y posteriormente proceder con la transferencia de datos hacia el actor. Los mensajes usados en el algoritmo, son:

- *SINKmessage*: Tipo de mensaje de control que envía el nodo Sink, el cual contiene el identificador (ID) del sumidero, número de mensajes hormiga que debe enviar cada nodo actor de acuerdo a su localización y número de nodos sensores asociados a él.
- *ANTmessage*: tipo de mensaje de control que libera cada nodo actor con la finalidad de elegir nodos CHs en la red.
- *JOINmessage*: tipo de mensaje de control que envían los nodos sensores que desean unirse a un grupo.
- *DATAmessages*: Mensaje de datos que los nodos generan para reportar eventos al actor asociado.

#### **IV.3.1 Fase de Inicialización del Algoritmo WS-ANT.**

El algoritmo WS-ANT comienza con la fase de inicialización, ver pseudocódigo de la Figura 7, en la cual el sumidero envía un mensaje *SINKmessage* a todos los nodos actores dentro de la red; con este mensaje se le informa a cada nodo actor sobre el número de mensajes *ANTmessage* (mensajes “hormiga”) que puede liberar cada uno de éstos para la formación de grupos. Posteriormente cada actor elige aleatoriamente a uno de sus vecinos y le envía un mensaje hormiga en el que se incluye un identificador de hormiga *ANTid*, el

identificador del actor *ACTORid* que la envía y un campo correspondiente al tiempo de vida del mensaje *TTL*. Después espera un tiempo y elige nuevamente a uno de sus vecinos de manera aleatoria para enviar la próxima hormiga. Este es un proceso cíclico que termina cuando los actores han enviado a todas sus hormigas.



**Figura 7. Fase de inicialización del algoritmo WS-ANT, a) en el nodo Sumidero y actor, b) en los nodos sensores**

Con respecto a los nodos sensores, cada uno de éstos debe inicializar primeramente los tres temporizadores *CS\_Timer*, *Join\_Timer* y *Timer*. Si un nodo sensor recibe un mensaje hormiga (*ANTmessage*), éste verificará que el identificador de actor corresponda con el identificador del actor al cual está asociado. Si la hormiga que reciben es de un actor diferente al que están asociados, entonces la regresan al nodo fuente y éste último buscará retransmitirla. En este último caso, los mensajes se regresan al nodo fuente para evitar que las hormigas se difundan sin control fuera del área de cobertura de cada nodo actor. Para el caso en que el nodo reciba una hormiga que liberó su actor, entonces elegirá nuevamente a un nodo vecino aleatoriamente, excluyendo al remitente para retransmitir la hormiga poniendo en el campo  $TTL = TTL - 1$ . El proceso de retransmisión del mensaje hormiga

finaliza cuando el valor de TTL es cero. Cuando un nodo tiene una hormiga con  $TTL=0$  la almacena y esto garantiza que será electo CH en la fase de *Agrupamiento para coordinación SS*. Cuando el nodo tiene almacenada una hormiga y recibe otra buscará retransmitirla a uno de sus vecinos, evitando el traslape de éstas.

Es importante mencionar que el número de hormigas que libera cada actor durante la fase de inicialización del algoritmo WS-ANT, corresponde al número óptimo de grupos que se formarán en el área de acción de cada actor. Esto implica que el sumidero ha calculado el número óptimo de grupos que se formarán en la red completa y que cada actor tendrá un número igual de mensajes hormiga para liberar una vez que se encuentran en la posición óptima. El número óptimo de grupos debe cumplir la relación proporcionada en la expresión (1) obtenida de (Selvakennedy, et al., 2007). En (Selvakennedy, et al., 2007) se considera que los nodos se despliegan de manera aleatoria en un plano de dos dimensiones siguiendo un proceso de Poisson espacialmente homogéneo con intensidad  $\lambda$ .

$$P_{opt} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon_{fs}}{\lambda \left[ \frac{\sqrt{1/6}M}{r} (2E_{elec} + \epsilon_{fs}r^2) - 2E_{elec} \right]}} \quad (1)$$

Donde  $P_{opt}$  es el porcentaje óptimo de hormigas (con respecto al número de nodos) requeridas para lograr el desempeño de agrupamiento óptimo en términos de disipación de energía. En la expresión (1),  $M$  representa la longitud de un lado del campo sensorio, elegido con tamaño  $M \times M$ ,  $r$  es el radio de transmisión de los nodos en la red,  $\epsilon_{fs}r^2$  es la energía por amplificación que depende de la distancia y la tasa de bit erróneo.  $E_{elec}$  es la energía electrónica que depende de factores como la codificación digital, modulación, filtrado y ensanchado de la señal.

### IV.3.2 Fase de Agrupamiento WS-ANT en la Coordinación SS

Durante la fase de *agrupamiento WS-ANT en la coordinación SS*, la selección de los nodos CHs y la formación de grupos se realizan una vez que expira el temporizador  $CS\_Timer$ . Todos los nodos que tengan una hormiga se volverán CHs. El número de CHs formados

será fijo y será igual para cada área correspondiente a un actor. La Figura 8 muestra el pseudocódigo del proceso de agrupamiento.

La Figura 8 a) muestra el proceso de selección de CHs. Cuando el *CS\_Timer* expira, cada nodo que ha almacenado una hormiga se elegirá así mismo como CH. Los CHs electos informarán a sus vecinos de su condición de CH, difundiendo un mensaje *CHmessage*. Los mensajes que envían los nodos informando sobre su condición de CH, contiene información relevante como el identificador del CH, identificador de actor y su ubicación en coordenadas (x, y, z).

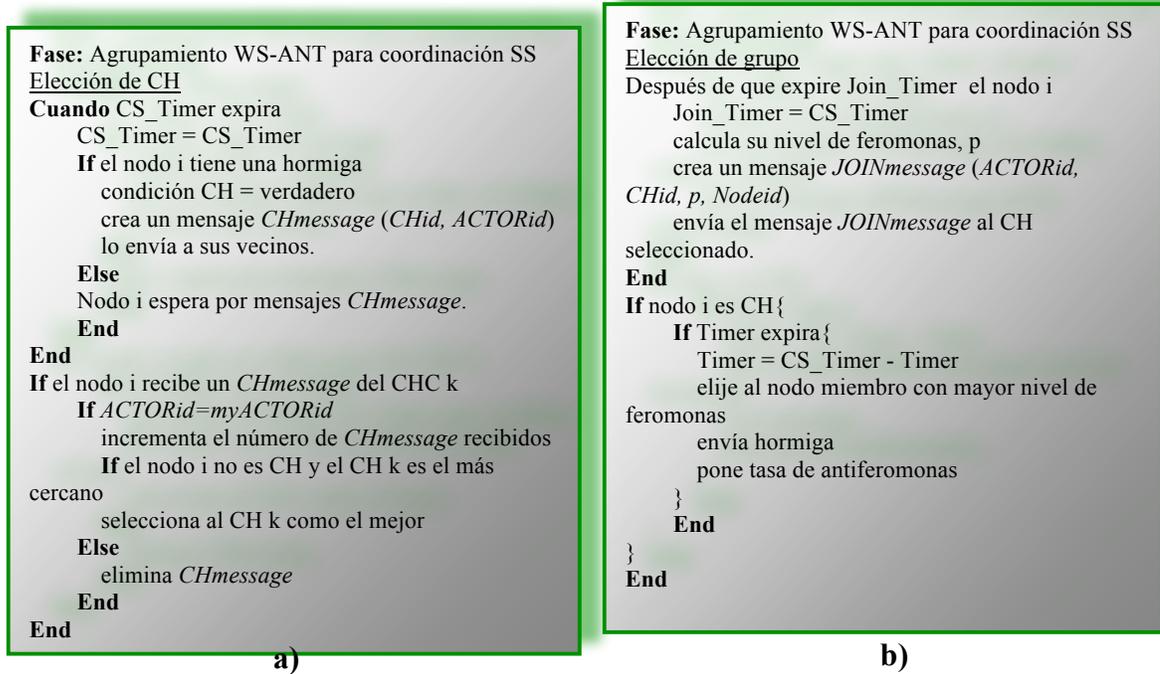
Cada nodo que no haya almacenado una hormiga y que su condición de CH sea falsa, esperará por mensajes *CHmessage*, una vez que haya expirado su *CS-Timer*. Los nodos que reciban *CHmessages*, calcularán la distancia a la cual se encuentran de los nodos CHs en su vecindario. El cálculo de la distancia se utiliza para elegir al mejor CH en su vecindario, el cual será el que se encuentre a una menor distancia.

En cada ronda durante la fase de *Agrupamiento para coordinación SS* los nodos guardarán el número de mensajes recibidos que afectará directamente su nivel de feromonas, sin tomar en cuenta los mensajes recibidos de CHs de otros actores. A partir de la primera ronda en la fase *Agrupamiento para coordinación SS* a través de los mensajes *CHmessage* las hormigas dejaran feromonas para guiar las trayectorias que seguirán durante el tiempo de vida de la red.

Cada nodo al expirar su *CS\_Timer*, lo reiniciará al valor que se le asignó en la fase de inicialización.

Para unirse a un grupo, cada nodo crea un mensaje *JOINmessage* que se envía al CH más cercano después de que haya expirado el *Join\_Timer*, como se muestra en la Figura 8 b). El mensaje *JOINmessage*, incluye el identificador de nodo, el identificador de CH al cual desean unirse, su nivel de feromonas y el identificador del actor asociado. Los nodos antes de enviar su mensaje *JOINmessage*, calcularán su nivel de feromonas de acuerdo a la expresión (2) y que inicialmente es 0 en todos los nodos. El nivel de feromonas incluye el valor de la energía residual del nodo, que este calcula de manera periódica. El nivel de

feromonas está fuertemente relacionado con el número de CHs que el nodo tiene en su vecindario y que identifica a través de los mensajes *CHmessage* recibidos.



**Figura 8. Fase de Agrupamiento WS-ANT para coordinación SS, a) Elección de nodo CH, b) Elección de grupo**

Cada vez que expire el *Join\_Timer* tomara el valor de inicialización de *CS\_Timer*.

$$P_i = \frac{P_{i-1} + \Delta p}{1 + \Delta p} \quad (2)$$

donde,

$$\Delta p = k \left( \frac{E_{resi}}{E_{max}} \right) \left( \frac{1}{n_c^2} \right) \quad (3)$$

De la expresión (2) y (3);  $P_i$  es la función de feromonas basada en la fórmula de probabilidad de envío usada en ant routing algorithm (Subramanian, 1997) y expresada en (Selvakennedy, et al., 2007).  $E_{resi}$ , es la energía residual del nodo,  $E_{max}$  es la energía inicial

o energía máxima de la batería,  $k=0.1$  es la tasa de aprendizaje del algoritmo y  $n_c$  es el número de CHs vecinos.

Cabe aclarar que los nodos CH que reciban mensajes *CHmessages* de CHs vecinos y los nodos que no sean CH y que no escuchen éste tipo de mensaje (nodos no cubiertos en un grupo), no calcularán su nivel de feromonas en la ronda.

La función de feromonas ayuda en la buena distribución de los CHs en toda la red y al balance de carga de manera indirecta. Cuando el nodo CH recibe mensajes *JOINmessage* identifica entre los nodos, a aquél nodo miembro con mayor nivel de feromonas que atraerá a su hormiga en la próxima ronda y que se volverá CH. Cuando *Timer* expira los nodos que son CHs liberaran a la hormiga almacenada.

Para evitar que las hormigas regresen a un nodo CH en un tiempo muy corto y se drene su energía mucho más rápido que en los demás nodos, el CH antes de enviar a su hormiga hacia el nodo que han detectado tiene mayor nivel de feromonas entre sus nodos miembro, pone en su nivel de feromonas una tasa de anti-feromonas para simular un decaimiento de su  $P_i$ . La tasa de anti-feromonas toma el valor  $aphe = 0.1$  (valor que consideraron los autores en T-ANT), de tal forma que el nodo CH calculara su nivel de feromonas como  $P_i = k * P_{i-1}$  antes de dejar su rol de cabeza de grupo.

Cada vez que *Timer* expire, el nodo reiniciará su valor a  $Timer = CS\_Timer - Timer$ .

### **IV.3.3 Fase De Recolección Y Transmisión De Datos**

El pseudocódigo de la fase de *Recolección y transmisión de datos* se muestra en la Figura 9.

```

Fase: Recolección y transmisión de datos
If el nodo i es CH espera DATAMessage de sus vecinos
    crea AGGREGATIONmessage
    envía AGGREGATIONmessage (ACTORid)
Else {
    If el nodo i pertenece a un cluster
        crea DATAMessage
        envía a su CH (CHid. ACTORid)
    Else
        envía DATAMessag (ACTORid, Nodeid)
    End
}
End

```

**Figura 9. Fase de Recolección y transmisión de datos**

Los nodos sensores pueden generar datos, incluso durante la fase de inicialización, cuando aun no se han formado grupos. Si la formación de grupos no se ha dado aun, los nodos enviarán sus datos a través de una ruta conocida hacia el actor, esa ruta se obtiene de acuerdo al protocolo de enrutamiento de múltiples trayectoria como lo hacen en (Gallardo Lopez, et al., 2007).

Cuando ya se ha finalizado el proceso de elección y formación de grupos los nodos CHs recibirán mensajes *DATAMessage* de sus nodos miembro y harán agregación de datos. En este trabajo de tesis se propone comprimir la información para ahorrar energía por el tamaño de bytes transmitidos por paquete. Al comprimir todos los datos que ha recibido durante un intervalo de tiempo, cada CH creará un mensaje *AGGREGATIONmessage* que enviará al actor, esta técnica además de ahorrar energía por el tamaño del paquete reducido también ayuda a minimizar el número de mensaje transmitidos en la red y como consecuencia, ayuda a minimizar la tasa de colisiones y a no saturar el canal por transmisiones de datos.

Para el caso de nodos no cubiertos en un grupo, es decir nodos que no escucharon ningún *CHmessage*, éstos se comportaran como CH que transmitirán sus datos hacia su actor a través de una ruta conocida.

## IV.4 Modelo de Simulación en OPNET

El algoritmo de agrupamiento propuesto en este trabajo y descrito en la sección anterior se implementó en el simulador de redes OPNET bajo la plataforma del estándar IEEE 802.15.4. Para realizar dicha implementación, se estudiaron los modelos de nodo, Nodo Sensor v1 y Nodo Sensor v2 descritos en el anexo B.2.1 (revisar anexo B para comprender terminología propia del ambiente de simulación en OPNET). Estos modelos soportan solamente topología estrella, donde la comunicación se establece entre dispositivos llamados dispositivos finales o dispositivos de red y un sólo controlador central, llamado Coordinador PAN. Cada nodo que opera en la red debe tener una única dirección. Que puede asignársele de forma manual por el usuario o la capa MAC generarla de manera aleatoria. Revisar Anexo A para familiarizarse con los modos de operación (con Beacon habilitado y sin Beacon habilitado) de la capa MAC IEEE 802.15.4 y mecanismos de comunicación como CSMA-CA ranurado y no ranurado, así como otros términos y definiciones manejados en el estándar.

El modelo de nodo tanto del Nodo Sensor v1 y Nodo Sensor v2 (ver Figura 51 y Figura 52) sólo implementan el modo de operación con Beacon habilitado y no implementan otras funciones como:

- Mecanismo CSMA-CA no ranurado
- Administración de la red (asociación y des-asociación)
- Capa de red Zigbee o cualquier otro algoritmo en esta capa.

Por lo anterior sólo es posible implementar una topología de red en estrella y no se puede realizar la comunicación multi-saltos, necesaria para probar el funcionamiento del algoritmo de agrupamiento que proponemos en esta tesis.

El modelo de nodo del Nodo Sensor v2 (Figura 52) puede ofrecer QoS al brindar ranuras de tiempo garantizadas a dispositivos que deseen transmitir datos con tiempo crítico. Inicialmente decidimos usar esta versión y agregar comunicación multi-saltos. Sin embargo, encontramos que resolver el problema de sincronización en redes con topología

en árbol operando la capa MAC en modo con Beacon habilitado no es una tarea fácil, como se muestra en (Attia, et al., 2006).

El modo de operación sin Beacon habilitado de la MAC IEEE 802.15.4 permite la comunicación ad hoc de los nodos incluso, sin la intervención de un coordinador central. El modo de operación sin Beacon habilitado ofrece la ventaja en simplicidad de implementación, escalabilidad de la red y comunicación independiente con respecto al modo de operación con Beacon habilitado. Estas ventajas se explicarán a continuación.

*Simplicidad de implementación:* No hay generación de tramas beacon, por lo cual no hay una administración de éstos. Tampoco se tiene que manejar la estructura de la supertrama y el mecanismo CSMA-CA no ranurado es más simple que el CSMA-CA ranurado.

*Escalabilidad de la red:* En el estándar IEEE 802.15.4 sólo se especifica la comunicación en topología estrella al usar el modo con Beacon habilitado. La topología estrella no es recomendable para usar muchos nodos en la comunicación ya que se generarían muchos problemas en el acceso al canal, como fallas en la transmisión o una alta tasa de colisiones. El problema de la cobertura de los nodos influye también en la topología estrella. Por otro lado el modo sin Beacon habilitado, permite crear redes con topología malla o árbol, obteniendo redes más grandes en número de nodos y cobertura de la red.

*Comunicación independiente:* la comunicación independiente es referente a que en modo sin Beacon habilitado, los nodos no necesitan recibir un beacon del Coordinador PAN para poder transmitir sus datos y a que no necesitan sincronizarse con la estructura de la supertrama, como es el caso del modo de operación con Beacon habilitado.

Debido a las características que ofrece el modo de operación sin Beacon habilitado, es que se eligió en este trabajo de tesis trabajar en éste modo de operación.

Ante lo anterior, se tuvieron que resolver dos problemas antes de iniciar con la implementación del algoritmo de agrupamiento:

- Modificar la capa MAC proporcionada en el modelo de simulación del Nodo Sensor v1 para que opere en modo sin Beacon habilitado y por lo tanto, usar el algoritmo CSMA-CA no ranurado.

- Lograr comunicación multi-salto en la red.

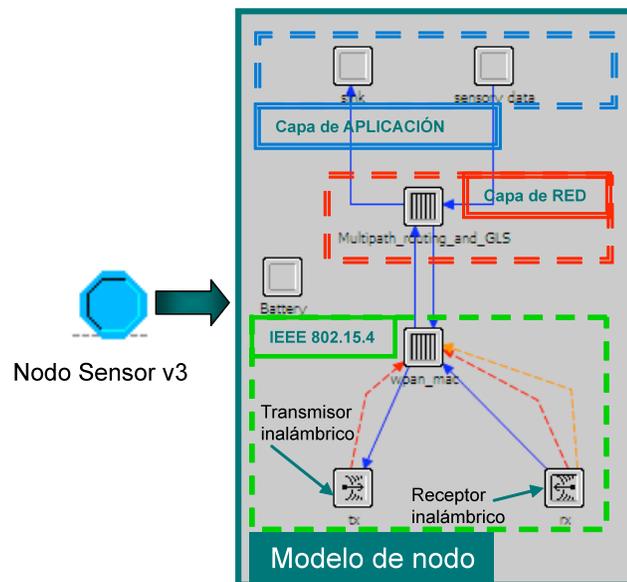
Para realizar los puntos anteriores, se hicieron cambios en la capa MAC del modelo en versión 1 para que trabaje en modo sin Beacon habilitado, es decir; sin usar la estructura de la supertrama. Y debido a que no fue posible implementar una nueva capa de red por el tiempo disponible para realizar esta tesis. Se optó por utilizar una capa de red con algoritmo de enrutamiento por multi-trayectorias realizado previamente en otro trabajo de investigación (Gallardo Lopez, et al., 2007). El algoritmo de enrutamiento adoptado fue implementado en OPNET sobre la plataforma del estándar IEEE 802.11. En el Anexo B.2.2 se muestra el modelo de nodo y el modelo de procesos en la Figura 53, así como la explicación general del algoritmo de enrutamiento realizado en (Gallardo Lopez, et al., 2007).

#### **IV.4.1 Modelo de Simulación del Algoritmo de Agrupamiento WS-ANT Aplicado en una Red WSAN.**

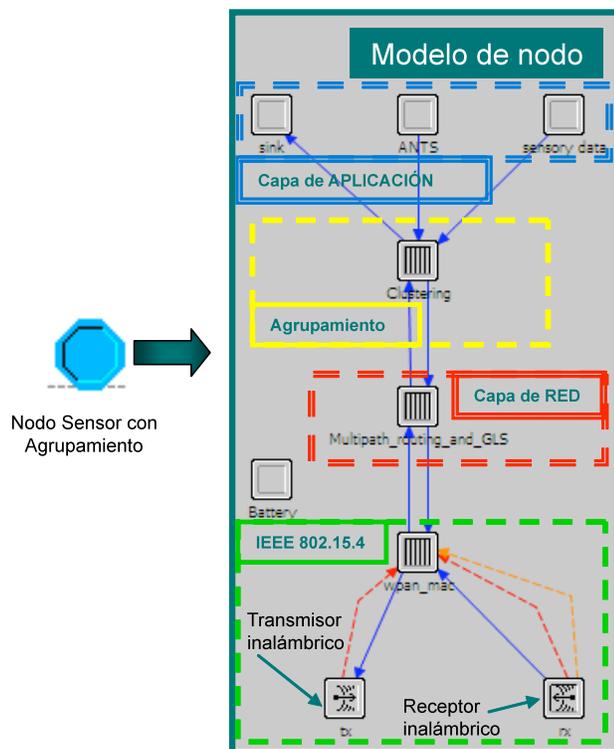
##### **IV.4.1.1 Modelo de Nodo**

En la Figura 10 se muestra la estructura de comunicación del modelo de nodo que llamaremos simplemente Nodo Sensor v3. En la Figura 11 se muestra la del modelo de nodo realizado en este trabajo, el cual describe el comportamiento del nodo sensor IEEE 802.15.4 con enrutamiento multi-trayectorias y agrupamiento de nodos, a este nodo lo llamaremos Nodo Sensor con Agrupamiento. Este último modelo implementa la capa Física equivalente al modelo del Nodo Sensor v1, incluye un transmisor y receptor trabajando a una frecuencia de 2.4 GHz, implementa capa MAC operando sin Beacon habilitado y usando el algoritmo CSMA-CA no ranurado. En la capa de Red se utiliza un algoritmo de enrutamiento por trayectorias múltiples y en la capa de aplicación se utiliza un generador de datos (*Sensory Data*) sin reconocimiento, es decir cuando un nodo transmite un paquete de datos no espera un ACK por parte del nodo receptor. Adicionalmente la capa de aplicación cuenta con un generador de mensajes hormiga o *ANTmessage* (módulo ANTS) que sólo se habilita en el nodo actor y de los cuales si se espera un mensaje ACK en capa MAC. Mientras que el módulo *Sink* se utiliza para obtener las estadísticas de las tramas de datos

recibidas. El modelo de nodo cuenta con el módulo *Battery* para el cálculo de la energía residual del nodo al igual que el Nodo Sensor v1.



**Figura 10. Modelo de nodo del Nodo Sensor v3.**

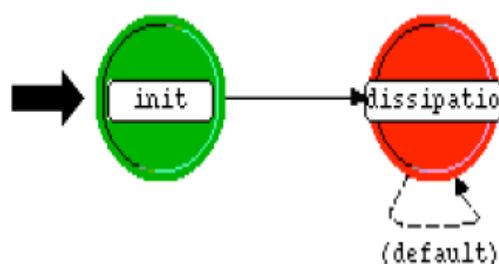


**Figura 11. Modelo de nodo del Nodo Sensor con Agrupamiento.**

#### IV.4.2.2 Módulo Battery

El modelo de nodo del Nodo Sensor con Agrupamiento cuenta con el módulo *Battery* el cual como ya se ha mencionado se usa para coleccionar estadísticas del consumo de energía por los nodos sensores al transmitir o recibir un paquete. Este módulo fue realizado en (Open-ZB, 2007).

El modelo de procesos del módulo *Battery* se muestra en la Figura 12. Después de la inicialización se realiza un proceso cíclico en el cálculo de consumo de energía, para lograrlo se utiliza una interfaz llamada ICI en OPNET, para obtener información de paquetes recibidos o transmitidos de los cuales informa la capa MAC a este módulo. En el cálculo de la cantidad de energía usada, influye el tamaño del paquete recibido y el tiempo en que se ha mantenido activo el nodo, es decir sin transmitir o recibir paquetes, pero con su transceptor radio encendido.



**Figura 12. Modelo de procesos de módulo *Battery***

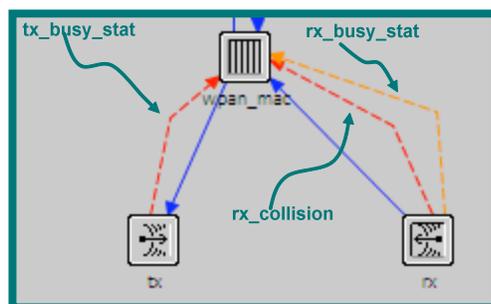
El consumo de energía se calcula en base a parámetros elegidos de las especificaciones del mote MICAz. En el módulo *Battery* es posible cambiar parámetros como la cantidad de energía inicial en Joules del nodo o elegir la energía inicial correspondiente a la capacidad de las baterías que usa el nodo, entre otros. Los parámetros de este módulo se muestran en la Figura 13. Debido a que no se usa la estructura de supertrama en capa MAC, no se considera la energía gastada en un nodo para el modo de ahorro de energía, ya que el nodo siempre se encuentra activo. El parámetro *Initial Energy* se puso a 10 Joules mediante la variable *Prueba*.

Attribute	Value
name	Battery
process model	wpan_battery_cluster_process
icon name	processor
Current Draw	(...)
Receive Mode (mA)	MICAz default
Transmission Mode (mA)	MICAz (0 dBm)
Idle Mode (µA)	MICAz default
Sleep Mode (µA)	MICAz default
Initial Energy	Prueba
Power Supply	2 AA Batteries (3V)

**Figura 13. Parámetros del módulo Battery.**

#### IV.4.2.3 Capa Física

El modelo de simulación contiene módulos inalámbricos estándar de OPNET, ver Figura 14, los cuales emulan el canal radio con elementos como interferencia, ruido, tasa de bit erróneo (BER), retardo de propagación, etc., a través de archivos que se le asocian a los objetos de transmisión y recepción. Tanto el módulo de transmisión y recepción, emplean las características de la especificación IEEE802.15.4. La capa Física opera en la banda de frecuencia 2.4 GHz con tasa de transmisión de datos de 250 kbps, potencia de transmisión de 1mW, entre otras especificaciones del estándar.



**Figura 14. Capa Física IEEE 802.15.4**

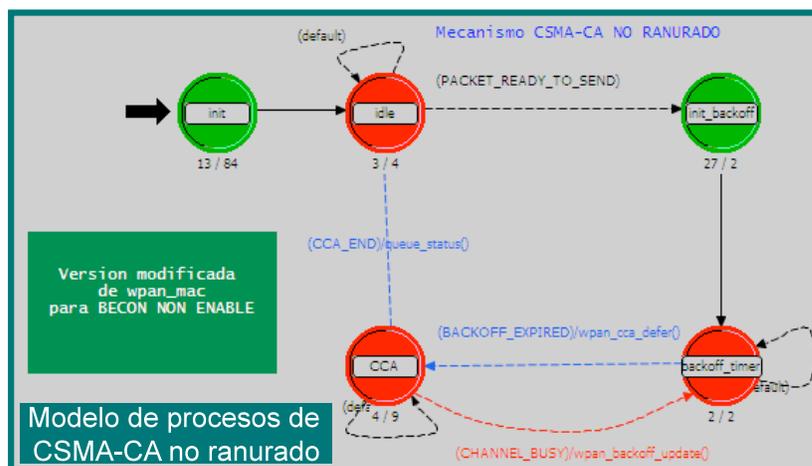
A través de las líneas punteadas que son conexiones de estadísticas, la capa Física proporciona información a capa MAC. Información tal como receptor o transmisor ocupados, o estadísticas de colisión, a través de rx\_busy\_stat (línea punteada que conecta al módulo receptor con el módulo de capa MAC), tx\_busy\_stat y rx\_collision (líneas punteadas que conectan al módulo receptor con el módulo de capa MAC) respectivamente.

Es necesario hacer una aclaración del como se genera el radio de cobertura en los nodos. Dicha cobertura se obtiene a partir de algunos criterios que se dieron inicialmente en capa de red y capa física, principalmente en esta última. Por omisión OPNET usa *pipeline stage* para soportar diferentes tipos de enlace. Los *pipeline stage* se asignan en los atributos del transmisor o receptor y cada uno de ellos puede definir el modelo de transmisión, modelo del retardo de propagación, modelo de terreno, modelo de línea de vista, así como el modelo de grupo de receptores. El grupo de receptores usa el *pipeline stage* *dra\_rxgroup*, en el que por omisión OPNET considera que todos los receptores son destinos potenciales. Dicho de otra forma, todos los nodos pueden escucharse sin importar a la distancia en la que se encuentren, por esta razón se modificó el *pipeline stage* *dra\_rxgroup* de tal manera que se asigna de manera manual el grupo de nodos a su alcance. Y así se pueda realizar el árbol de distribución en capa de red. Sin la modificación del *dra\_rxgroup* la topología que se formaría únicamente podría ser estrella.

#### **IV.4.2.4 Capa MAC**

El modelo de procesos de la capa MAC IEEE 802.15.4 con algoritmo CSMA-CA no ranurado se muestra en la Figura 15. Se tuvo que eliminar el estado *wait\_Beacon* del Nodo Sensor v1, ya que en éste la comunicación interna del modelo de nodo, depende de su función como dispositivo en la red (Coordinador PAN o dispositivo Final) y de si recibe un primer Beacon. Si el nodo es el Coordinador PAN, éste inicia la comunicación cuando recibe una primera trama Beacon que genera la capa de aplicación en el módulo *Sink*. En este caso, cuando la capa MAC recibe la primera trama Beacon generada por él mismo y a partir de algunos valores de los campos del paquete, calcula la estructura de la supertrama y por ende el tiempo del periodo activo e inactivo. Cuando el nodo es dispositivo final, antes de iniciar la actividad de comunicación, se debe recibir un Beacon de la red (proveniente del Coordinador PAN). Ya sea que el dispositivo sea el Coordinador PAN o un dispositivo final; si no reciben el Beacon no puede iniciarse la comunicación de datos. El nodo coordinador PAN no transmitiría nunca el Beacon y por lo tanto los nodos sensores no tendrían información acerca de la estructura de la supertrama, por lo cual no sabrían en que ranuras de tiempo podrían transmitir sus datos.

También se realizaron los cambios necesarios para el algoritmo CSMA-CA no ranurado, de la manera como se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 44, ver anexo A en explicación de dicho algoritmo. Dicho de otra forma, se eliminó el cálculo de la supertrama (al eliminar el Beacon), los periodos de *backoff* de un cierto dispositivo no necesita sincronizarse con los de otros dispositivos ya que todas las transmisiones en este modo se realizan con CSMA-CA no ranurado, excepto las tramas ACK. Esta capa es responsable de la transmisión y retransmisión de paquetes. Cuando un nodo recibe cualquier tipo de paquete de capa de red, coloca los paquetes en un buffer FIFO y cuando el paquete está listo para enviarse, el nodo espera un tiempo aleatorio antes de empezar el procedimiento Clear Channel Assesment (CCA). Cuando expira ese tiempo de *backoff* comienza el CCA y se evalúa si el canal está libre a través de la conexión de estadísticas, *rx\_bussy\_stat*. Si el canal se encuentra ocupado, entonces se repite el procedimiento de *backoff* regresando al estado *backoff\_timer*, de tal forma que se reinicia ese temporizador seleccionando un nuevo tiempo aleatorio.

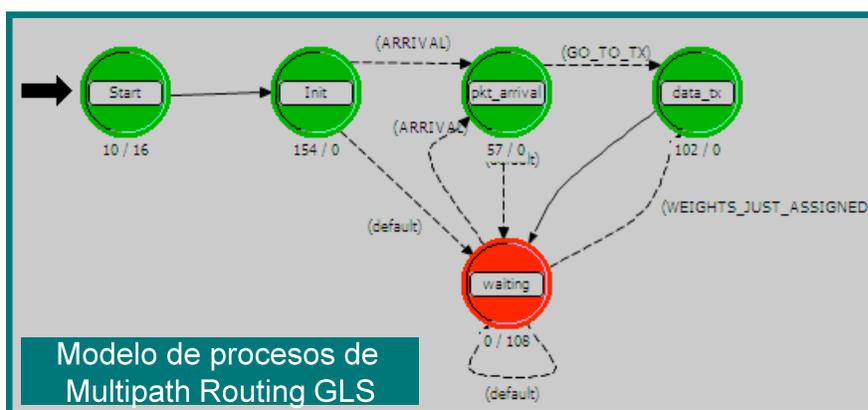


**Figura 15. Modelo de procesos de capa MAC en modo sin Beacon habilitado**

Cuando la capa MAC recibe un paquete de capa física (de la red), verifica la dirección mac destino de ese paquete. Si el paquete tiene la dirección mac del nodo o dirección broadcast (65535 correspondiente a 0XFFFF en hexadecimal) extraerá la carga útil del paquete y la enviará a capa de red, en otro caso desechará ese paquete y para efectos de consumo de energía no le informará al módulo *Battery* de haber recibido un paquete.

#### IV.4.2.5 Capa de RED.

Se utilizó una capa de red sobre las capas IEEE 802.15.4, por lo que se hicieron algunos cambios al modelo de procesos de la capa de red original, ver Figura 53 . Por ejemplo, se tuvieron que hacer modificaciones relacionadas con la manera de obtener la dirección mac del nodo así como la manera de calcular la energía gastada por los nodos. En la capa de red original la energía gastada sólo es calculada cuando el nodo transmite paquetes, sin la consideración de paquetes recibidos y tiempo activo del nodo. Así que se hicieron los cambios necesarios para obtener dicha información del módulo *Battery* que es quien realiza cálculos de niveles de energía gastada. La Figura 16 muestra el modelo de procesos de la capa de red. Además se realizaron cambios para dar tratamiento a los diferentes tipos de paquetes provenientes del módulo de agrupamiento.



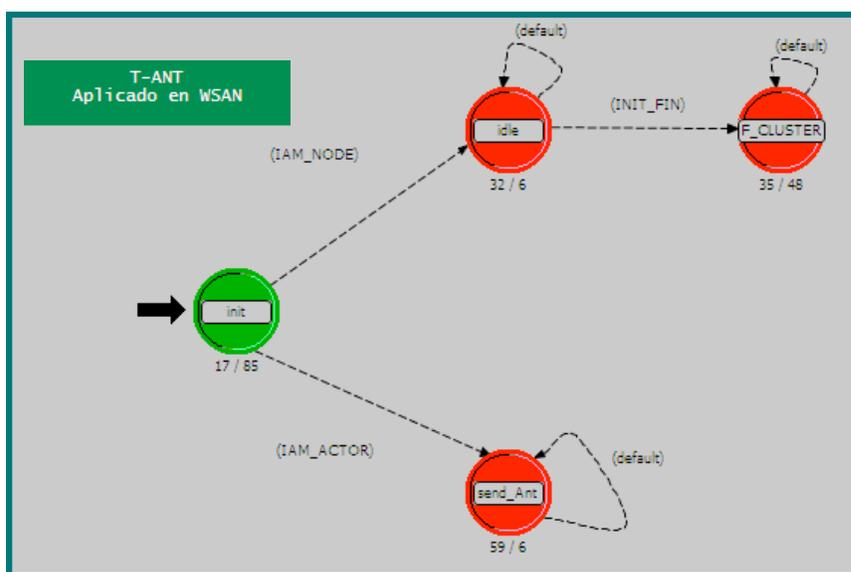
**Figura 16. Modelo de procesos de capa de red con algoritmo de enrutamiento multi-trayectorias**

Básicamente este algoritmo después de haber descubierto rutas múltiples y haber asignado un peso a cada una de ellas, puede comenzar a transmitir datos, los cuales son repartidos por las rutas múltiples a través del Algoritmo de repartición generalizada de carga (Generalized Load Sharing por sus siglas en inglés), descrito por (Gallardo Lopez, et al., 2007), Revisar anexo B.2.2.

#### IV.4.2.6 Módulo De Agrupamiento

A continuación se presenta el modelo de procesos que describe el comportamiento del algoritmo de agrupamiento aplicado a redes WSN, ver Figura 17. Este modelo de

procesos lo comparten dos tipos de nodos; nodo sensor y nodo actor en la red WSN. El algoritmo se inicia en el estado *Init*, donde se inicializan variables, temporizadores y procesos, cada nodo obtiene su dirección mac, se obtiene información de atributos del nodo, etc. Esta capa obtiene información de tabla de vecinos proporcionada por capa de red, ya que el algoritmo debe conocer a que nodos vecinos puede enviar mensajes de control o de datos. Cuando se accede a los atributos (parámetros) del nodo y se obtiene que el atributo *Device Mode* es igual a actor (PAN Coordinator, en el caso de capa MAC), se activa la bandera *IAM\_ACTOR* y entonces cambia al estado *send\_Ant*. En este estado el nodo obtiene tabla de vecinos que proporciona la capa de red a través de interfaces ICI. Después de esto cuando el nodo reciba mensajes *ANTmessage* del módulo ANTS lo encapsula en un formato de paquete, elige aleatoriamente a uno de sus vecinos y manda ese paquete a capa de red quien lo encapsula nuevamente (es decir agrega encabezado de red y coloca el paquete recibido en la carga útil) y ésta lo pasa a capa MAC que agrega encabezado y lo transmite usando el algoritmo CSMA-CA no ranurado como trama tipo Command. El nodo actor no envía mensajes de datos a la red. En seguida la capa MAC envía el paquete al módulo transmisor.



**Figura 17. Modelo de procesos del algoritmo de agrupamiento WS-ANT para redes WSN.**

Además en el estado *send\_Ant* también se reciben mensajes de capas inferiores, del cual extrae la carga útil y verifica el tipo de paquete que puede ser *DATA* o *CHmessage*. Se hace la observación que en el estado *send\_Ant* no se reciben mensajes tipo *ANTmessage* ni *JOINTmessage* ya que los nodos sensores nunca elegirán al actor para enviarle una hormiga ni un mensaje de unión porque el actor nunca se elige como CH. En el caso de la recepción de mensajes tipo *DATAmesssage*, éstos se mandan hacia el módulo *Sink* para colección de estadísticas. Por otro lado, la recepción de mensajes tipo *CHmessages* se debe a que estos mensajes se transmiten en forma broadcast a los nodos vecinos y el actor puede ser vecino de un CH. Cuando se reciben mensajes *CHmessage*, éstos son simplemente desechados en el estado *send\_Ant*.

En el caso de que el nodo que esté ejecutando el algoritmo de agrupamiento, sea un nodo sensor, después del estado *Init* se activará la bandera *IAM\_NODE* y pasara al estado *idle* donde estará recibiendo paquetes de capa de aplicación o de capas inferiores. Pasa al estado *F\_CLUSTER* cuando se activa la bandera *INIT\_FIN*, indicando que terminó la fase de inicialización del algoritmo, descrito en el capítulo IV. En este último estado, se verifica si el CS-Timer expiró para que si el nodo tiene una hormiga con TTL=0 la almacene y genere un mensaje tipo *CHmessage* como ya se ha mencionado antes. O en el caso de recibir un mensaje de un CH, el nodo generaría un *JOINmessage* después de que expire su temporizador *JOIN\_Timer*.

Los mensajes de datos generados por un CH y recibidos de sus nodos miembro, así como los datos generados por un nodo no cubierto en un grupo se enviarán a la capa de red para ponerlos en un buffer y que estos sean transmitidos cuando se tenga disponible una ruta.

Los paquetes de datos generados en capa de aplicación por nodos que son nodos miembro, no seguirán tratamiento habitual en el algoritmo de red, serán transmitidos de manera inmediata hacia capa MAC (sin pasar por el buffer) y ésta transmitirá los datos con dirección destino del CH electo por cada nodo miembro. La transmisión unicast de los datos, ahorra energía debido a que los demás nodos vecinos no recibirán ese paquete como en el caso de la transmisión broadcast.

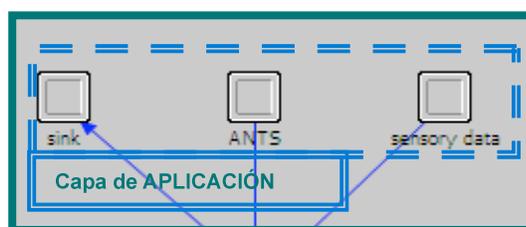
Como dato adicional, se comenta que todos los mensajes de control que se generan en capa de red se transmiten en modo broadcast, mientras que en el módulo *Clustering* sólo los mensajes tipo *CHmessage* lo hacen de esa manera, ya que *ANTmessage* y *JOINmessage* se transmiten de manera unicast. Todos los mensajes de control que se generan en el módulo *Clustering* y en la capa de red se transmiten como tipo Command y los datos generados por el propio nodo así como los que tiene que retransmitir de otros nodos, se tratan en capa MAC como tipo *DATA*, de acuerdo al estándar IEEE 802.15.4. Otro dato importante es que por cada mensaje *ANTmessage* y *JOINmessage* que envía un nodo, se espera recibir un mensaje de reconocimiento ACK. La petición de reconocimiento por los mensajes hormiga y de unión a un grupo se hace para evitar que no se forme un grupo en la próxima ronda (por la pérdida de un mensaje hormiga) o evitar que un nodo no se asocie a un grupo. En este último caso, si no se recibe el mensaje de reconocimiento ACK (debido a colisiones o porque el canal se encuentra ocupado) después de un tiempo determinado, la capa MAC intentara retransmitir el mensaje de control un cierto número de veces. Debido a retransmisiones puede haber mensajes duplicados y ocurriría el caso contrario a cuando se pierde una hormiga. La capa MAC implementada no resuelve el problema de tramas duplicadas, por lo que se tuvo que resolver tal problema en el módulo Clustering.

La implementación del algoritmo no realiza la agregación de datos que se propuso en el diseño presentado en el capítulo IV, ya que representa implementar un algoritmo en OPNET que acceda a la información del valor de datos enviados por los sensores y comprimirlos de manera eficiente, además de la contraparte en que el nodo actor descomprima esos datos y obtenga los datos de manera correcta, es decir que reciba la misma información enviada por los nodos en la red. Cabe aclarar que las simulaciones se realizan con un solo actor, ya que el algoritmo de enrutamiento usado fue realizado para una red WSN y que en el caso de una topología de red WSAN con múltiples actores se requieren modificaciones para poder crear los árboles de distribución en donde el algoritmo de enrutamiento debe considerar como raíces de estos árboles a los nodos actores. Es decir cada nodo actor en capa de enrutamiento debe crear un árbol de enrutamiento sin que se traslapen con los de otros actores. A pesar de la restricción en enrutamiento para la arquitectura de red WSAN, la implementación del algoritmo de agrupamiento WS-ANT

considera la presencia de varios nodos actores y es por eso que los nodos procesan paquetes de control y datos sólo de nodos que están asociados a su nodo actor, en otro caso desecharían paquetes de un actor diferente al cual están asociados.

#### IV.4.2.7 Capa De Aplicación.

La capa de aplicación está compuesta por 3 módulos, como se ilustra en la Figura 18. Un módulo llamado *Sink*, que se usa con la finalidad de obtener estadísticas referentes al tráfico de datos recibido por el actor. Tales métricas pueden ser, cantidad de paquetes recibidos en bits, bits/segundo, paquetes o paquetes/segundo, el retardo extremo a extremo en la transmisión de dichos paquetes es otra métrica que puede obtenerse a través de este módulo. La capa de aplicación tiene dos fuentes generadoras: módulo ANTS y módulo *Sensory Data*. El módulo ANTS es el responsable de generar mensajes de control tipo *ANTmessage*, dichos mensajes sólo son generados por el nodo actor. El módulo ANTS genera en la capa de aplicación un mensaje *ANTmessage* que enviará hacia el módulo *Clustering* y éste pasará el mensaje a la capa de red y ésta a capas inferiores. Cuando el mensaje tipo *ANTmessage* llega a Capa MAC se solicita un mensaje de reconocimiento ACK en respuesta de su transmisión, la capa MAC puede retransmitir una copia del mensaje hasta en 256 intentos, según el estándar. Esto se hace con la finalidad de no perder mensajes hormiga, ya que son de suma importancia durante el proceso de la formación de un grupo en cada ronda. El otro módulo que compone la capa de aplicación es el que se encarga de generar mensajes de datos, dicho módulo, tiene por nombre *Sensory Data*.



**Figura 18. Capa de aplicación del Nodo Sensor con Agrupamiento**

## **IV.5 Resumen del Capítulo.**

En este capítulo se han explicado las modificaciones realizadas al algoritmo de agrupamiento T-ANT para su aplicación en una arquitectura de red WSAN. Las modificaciones son principalmente en la distinción de los mensajes de control.

El algoritmo de agrupamiento T-ANT no tiene problemas en cuanto a liberar mensajes hormigas, o por la comunicación de mensajes de unión o de datos, debido a la presencia de varios nodos sumideros o actores. En el caso de WS-ANT, los nodos actores liberan a sus hormigas y éstas se traslaparán en algún momento, es necesario delimitar el área en el cual viajarán las hormigas y los demás tipos de mensajes para lograr la comunicación eficiente. En este trabajo, se ha propuesto que los nodos estén consientes de su asociación a un nodo actor, dicha información será usada para procesar o desechar los mensajes provenientes de distintos nodos actores.

En este capítulo también se ha presentado la explicación del modelo de simulación en OPNET.

## Capítulo V

---

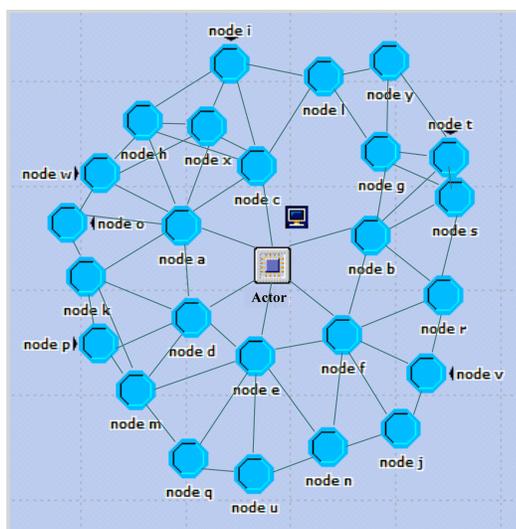
### **Evaluación y Resultados de Simulación de WS-ANT para Redes WSN**

En el capítulo anterior se presentó la estructura del modelo de simulación obtenido para llevar a cabo la evaluación y validación de la propuesta de diseño del algoritmo de agrupamiento aplicado a redes inalámbricas de sensores y actores. En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas de esta propuesta, así como los resultados obtenidos de la misma estructura, sin aplicar el algoritmo de agrupamiento. La métrica principal que se desea evaluar es el ahorro de energía en la red WSN a través del agrupamiento de nodos para obtener una comunicación local y como consecuencia lograr extender el tiempo de vida de la red. La validación de la propuesta se demuestra a través de la presentación de gráficas que permiten evaluar su desempeño.

De manera adicional, este capítulo tiene como objetivo presentar las principales conclusiones del trabajo de investigación así como la propuesta de trabajo futuro.

#### **V.1 Consideraciones De Simulación**

A continuación se muestran los parámetros usados en el escenario de simulación presentado en la Figura 19, donde las líneas representan conectividad debido al radio de cobertura de los nodos.



**Figura 19. Topología de red, usada en escenario de simulación.**

En el ambiente de simulación se considera un solo nodo actor, debido a que no es posible simular una red WSN con varios actores, por la limitante que se tiene en la capa de red, que fue diseñada para una red WSN donde el nodo sumidero es la raíz del árbol de distribución. Para simular el comportamiento del algoritmo de agrupamiento con varios nodos actores, es necesario que la capa de red sea capaz de generar un árbol de distribución donde cada nodo actor sea la raíz del árbol de distribución y que no se traslapen dichos árboles con el de otros actores. Se consideran 25 nodos sensores en la red, los cuales generarán mensajes de datos periódicamente. Se consideran 10 Joules de carga inicial en la batería de cada nodo, para evaluar las métricas necesarias en un menor tiempo de simulación. La red tiene un área de 100 x 100 m, dicho tamaño fue tomado de los parámetros de simulación usados en el mecanismo de agrupamiento (Selvakennedy, et al., 2007) que se tomó como referencia para realizar el propio en esta tesis. También se tomó de dicho trabajo, el valor de radio de transmisión de los nodos, tiempo de ser cabeza de grupo, tamaño de paquete e intervalo de generación de mensajes sensados. Las características generales de la topología de red son:

- 1 nodo Actor
- 25 Nodos Sensores que generan datos:
- Tamaño del campo sensorio: 100x100 m

- Energía inicial de Actor/Nodo: 10 J

### **Capa Física**

En capa Física se consideran las características especificadas en el estándar IEEE.802.15.4 operando en la banda de frecuencia de 2.4 GHz con los parámetros correspondientes fijados en los atributos del módulo transmisor y receptor del modelo de nodo usado en OPNET. El radio de transmisión se ajusta en base a ciertos criterios que se toman en capa de red y física, sobre todo en la capa física, a través de un *pipeline stage* asociado al objeto receptor, como se explica en la sección IV.4.2.3. Esto complica crear redes densas por lo cual sólo se usaron 25 nodos sensores. Los principales parámetros de capa física son:

- Potencia de transmisión (Actor/Nodo): 1 mW
- Radio de Tx: 30 m
- Velocidad de transmisión: 250 kbps
- Banda de frecuencia: 2.4 GHz
- Velocidad de transmisión: 250 kbps

### **Capa MAC**

En la capa MAC se consideran hasta 8 retransmisiones de paquetes en un nodo que ha solicitado mensaje de reconocimiento (ACK) como respuesta del nodo destino cuando este último recibe un mensaje en el que la bandera de petición de ACK esta activada. El mínimo exponente de *backoff* y máximo número de *backoffs* se asignó debido a que con los valores 5 y 4 respectivamente se tuvieron mejores resultados en cuanto a la disminución de perdida de paquetes. Los principales parámetros de capa MAC son:

- Modo sin Beacon habilitado
- Mecanismo de comunicación CSMA-CA no Ranurado
- Formatos de tramas DATA, ACK y Command
- Dirección mac: asignada manualmente
- Número de retransmisiones: 8

- Mínimo exponente de *Bakoff*: 5
- Máximo número de *Backoff*: 4

### **Capa de Red**

No se realiza actualización de rutas en la capa de red para evitar el consumo de energía por dicha actualización periódica, esto debido a que la topología se mantiene fija. La capa de red en cada nodo descubre las rutas múltiples una sola vez y esas son las que el nodo usa para enviar sus datos, durante todo el tiempo de simulación.

### **Agrupamiento:**

Como ya se ha mencionado anteriormente, el tiempo de ser CH que se usó en la simulación corresponde al mismo que usaron los autores de T-ANT en (Selvakennedy, et al., 2007), el tiempo que esperan los nodos antes de enviar su mensaje *JOINmessage* (*JOIN\_Timer*) indicando el nodo CH que han electo se consideró de 1 segundo ya que en un tiempo mucho menor que esto (en pruebas de simulación), los nodos ya habían recibido todos los mensajes *CHmessage* de CHs vecinos. El tiempo de vida TTL de los mensajes hormiga durante la fase de inicialización se establece a 2, que corresponde al número de saltos correspondiente a la mitad de la longitud del campo sensorio. Durante la fase de formación de grupos las hormigas viajan sólo a un salto. Los principales parámetros utilizados en el proceso de formación de grupos son:

- Tiempo de ser CH: 20 segundos
- Tiempo de unión de nodo después de recibir mensajes de CH: 1 segundo
- TTL en fase de inicialización: 2
- TTL en fase de formación de grupos: 1

### **Capa de Aplicación**

La capa de aplicación tiene dos módulos generadores y un módulo colector de mensajes de datos, como ya ha explicado anteriormente. En el módulo *Sensory Data* se tomó en el tamaño de paquete de datos y el intervalo de generación de éstos equivalentes a los usados en (Selvakennedy, et al., 2007). El nodo actor genera en el módulo ANTS, 6 Mensajes

Hormiga (*ANTmessage*) con diferencia de 1 segundo entre mensajes. El número de hormigas que libera el actor se obtuvo de manera experimental, con este número se logra que la mayoría de los nodos en la red pertenezcan a un grupo. Los principales parámetros utilizados en los módulos generadores de tráfico en la capa de aplicación son:

#### *Módulo Sensory Data*

- Generación de tráfico en todos los nodos sensores: CBR (Constant Bit Rate)
- Tamaño de paquete: 30 Bytes
- Tiempo de generación de paquetes de datos: cada 2 segundos
- Los nodos tienen un pequeño desfase al iniciar a generar datos, esto para evitar un poco las colisiones provocadas por inicio de transmisión al mismo tiempo.

#### *Módulo ANTS*

- Número de hormigas generadas: 6 mensajes tipo *ANTmessage*
- Tiempo de generación de mensajes hormiga: cada segundo
- Inicio de generación de mensajes hormiga: segundo 1
- Finalización de la generación de mensajes hormiga: segundo 6

Como aclaración, se comenta que en la Tabla II cuando se dice nodo 1 se refiere al *node a*, nodo 2 al *node b* y así sucesivamente, cuyo número en la tabla, corresponde a la dirección mac asignada manualmente.

## **V.2 Resultados de simulación**

La Tabla II muestra la tabla de vecinos que se obtiene por la distribución de los nodos en la red y de acuerdo a la cobertura que se está considerando en cada nodo, la cual es de 30 metros.

La Figura 19 Muestra la topología de la red WSN usada en la simulación para probar la comunicación de nodos usando agrupamiento de éstos. Las líneas indican conectividad entre nodos (vecindario). La red WSN simulada está compuesta de 25 nodos sensores y

un solo actor, ambos cuentan con las mismas características computacionales, radio de transmisión, batería inicial, etc.

**Tabla II. Tabla de vecinos.**

Nodo	Vecinos	Num. De Vecinos	Nodo	Vecinos	Num. De Vecinos
Nodo 13:	4,5,11,16,17	5 vecinos	Nodo 13:	4,5,11,16,17	5 vecinos
Nodo 14:	5,6,10,21	4 vecinos	Nodo 14:	5,6,10,21	4 vecinos
Nodo 15:	1,11,23	3 vecinos	Nodo 15:	1,11,23	3 vecinos
Nodo 16:	11,13	2 vecinos	Nodo 16:	11,13	2 vecinos
Nodo 17:	5,13,21	3 vecinos	Nodo 17:	5,13,21	3 vecinos
Nodo 18:	2,22	2 vecinos	Nodo 18:	2,22	2 vecinos
Nodo 19:	2,7,20	3 vecinos	Nodo 19:	2,7,20	3 vecinos
Nodo 20:	2,7,19,25	4 vecinos	Nodo 20:	2,7,19,25	4 vecinos
Nodo 21:	5,14,17	3 vecinos	Nodo 21:	5,14,17	3 vecinos
Nodo 22:	6,10,18	3 vecinos	Nodo 22:	6,10,18	3 vecinos
Nodo 23:	1,8,15,24	4 vecinos	Nodo 23:	1,8,15,24	4 vecinos
Nodo 24:	1,3,8,9,23	5 vecinos	Nodo 24:	1,3,8,9,23	5 vecinos
Nodo 25:	7,12,20	3 vecinos	Nodo 25:	7,12,20	3 vecinos

La posición de los nodos se realizó haciendo una única consideración, que existiera conectividad suficiente para que no existieran nodos sensores aislados (nodos desconectados). La conectividad como bien se ha dicho depende del número de nodos por unidad de área (densidad de los nodos) y de la potencia de transmisión. En T-ANT aplicado en WSN hacen un estudio del número de CH óptimo que debe haber en la red, considerando un despliegue de nodos de manera aleatoria en un plano bidimensional, siguiendo un proceso de Poisson espacialmente homogéneo con intensidad  $\lambda$ . De tal manera, que no podemos aplicar esa fórmula para nuestro caso, ya que no se sigue una distribución específica. Por lo que el número de CH se obtuvo de manera experimental.

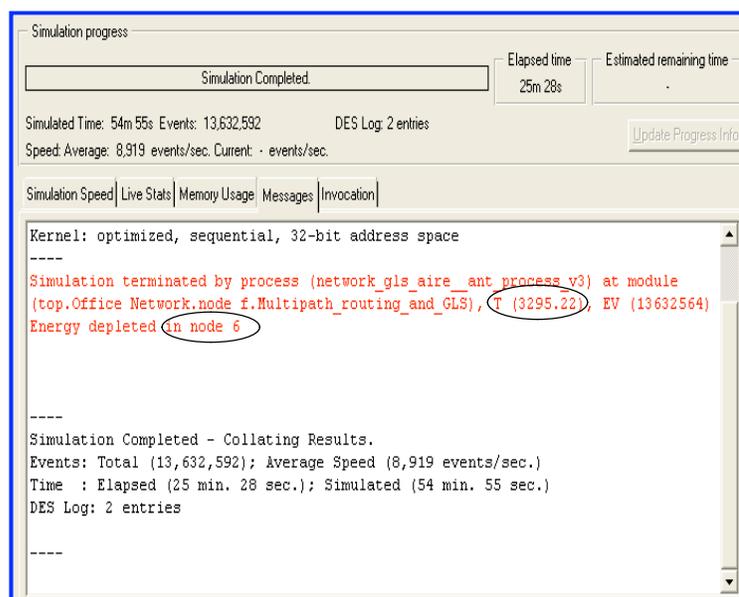
### **V.2.1 Resultados aplicando agrupamiento en la red WSAN**

Uno de los mayores retos es el extender el tiempo de vida de redes WSAN, a través del consumo eficiente de energía. Las redes WSN y WSAN están limitadas en energía debido a que sus nodos se alimentan generalmente mediante baterías no recargables.

El tiempo de vida de la red, se obtiene en el instante de tiempo en que el primer nodo en la red ha consumido ya el 60% de su energía inicial. En este trabajo de tesis se considera que

el tiempo de vida de la red es el intervalo de tiempo en el cual el primer nodo comienza actividad de comunicación con los demás nodos en la red (En este caso el nodo actor que es quien comienza el proceso de búsqueda de rutas en capa de red) y hasta el momento en que un primer nodo a través de su módulo *Battery* haya calculado que su energía residual está por debajo de un umbral. El umbral es un porcentaje de la energía inicial del nodo. Para este trabajo se ha considerado que el umbral referido anteriormente es el 40% de la carga máxima.<sup>2</sup>. Se ha observado experimentalmente con nodos reales que su desempeño cae de tal manera que la forma de comunicación ya no se considera fiable una vez que la batería de los nodos está por debajo del 40% de la carga máxima.

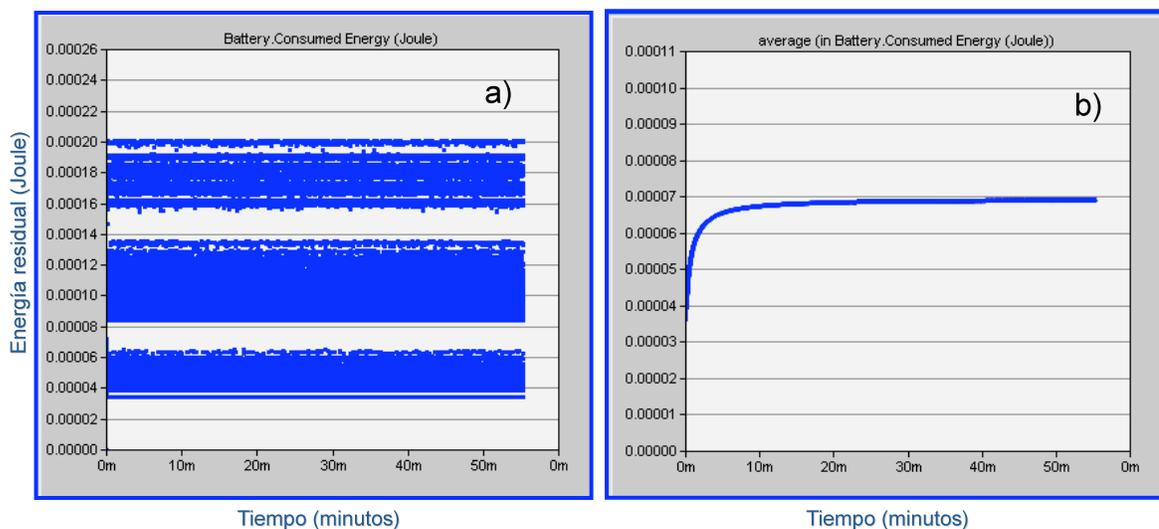
El tiempo de vida de la red aplicando el algoritmo de agrupamiento se muestra en la Figura 20. El tiempo de vida de la red concluye, en este caso cuando el nodo 6 (node f) ha consumido ya el 60% de su carga máxima. Tal tiempo de vida de la red toma un valor de 3295.22 segundos.



**Figura 20. Tiempo de vida de la red aplicando agrupamiento de sensores.**

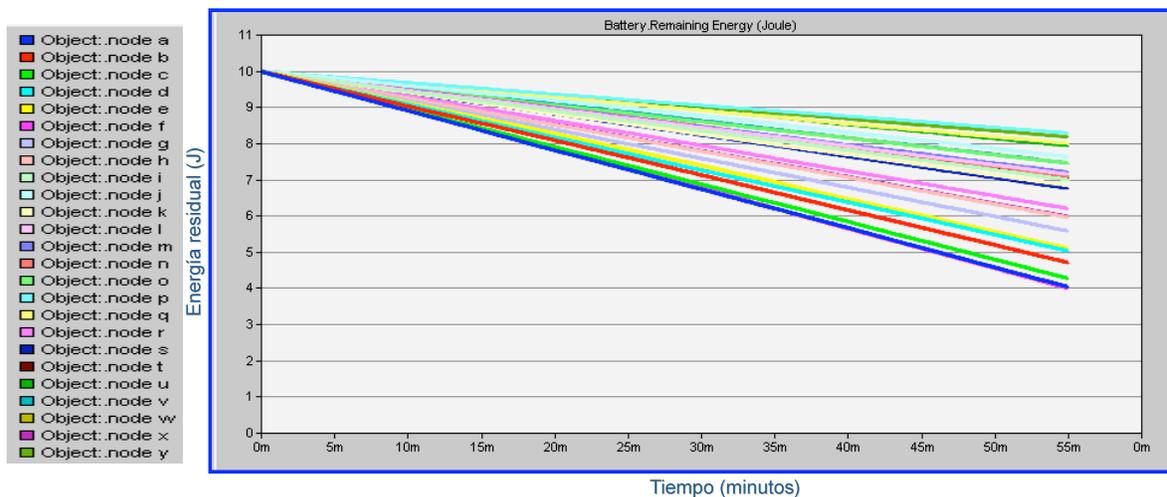
---

<sup>2</sup> El valor adoptado se ha tomado como sugerencia del Dr. José Antonio García (investigador de CICESE), debido a su experiencia con nodos sensores reales.



**Figura 21. Consumo global de energía en la red, a) Energía consumida por todos los nodos, b) Energía promedio consumida por todos los nodos.**

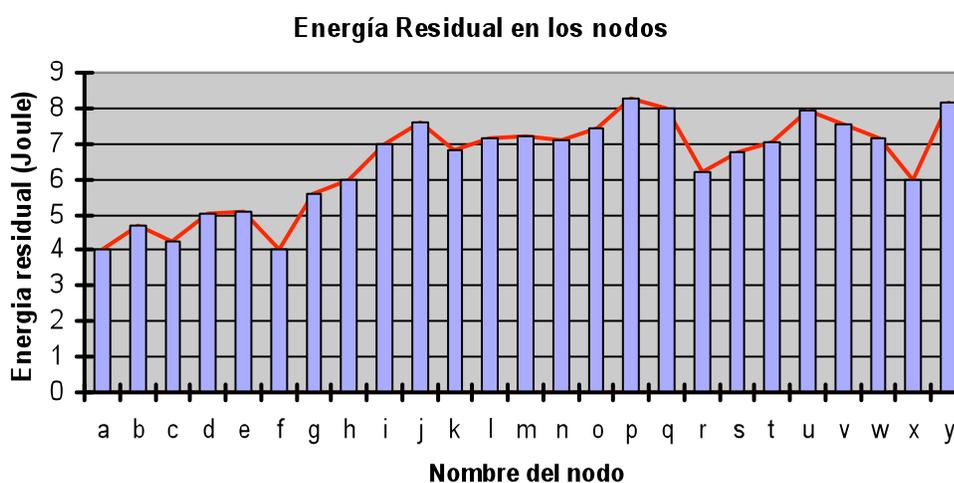
El consumo de energía por todos los nodos, incluyendo al nodo actor, se muestra en la Figura 21. La cantidad de energía total consumida es de 94.5 J (Se obtuvo de la energía inicial total menos la energía residual total), también se muestra la energía promedio consumida durante el tiempo de operación de la red. La energía consumida por el actor es del 6.99% de la energía total consumida y cada nodo consumió en promedio 3.84%. Los nodos que consumen mayor energía son los nodos más cercanos al actor, ya que éstos deben retransmitir la información que es sensada por los nodos sensores que se encuentran más lejos del nodo actor.



**Figura 22. Energía residual en cada nodo sensor en el tiempo.**

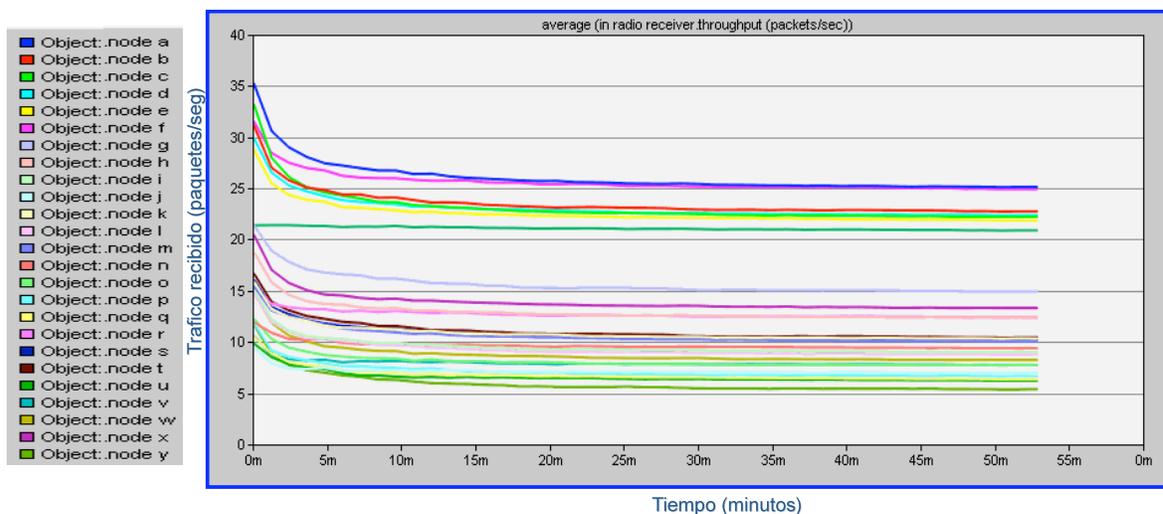
La Figura 22 muestra el comportamiento que sigue la energía residual de cada nodo al transcurrir el tiempo. El comportamiento del consumo de energía en cada nodo depende, como ya se ha mencionado antes de la cantidad y tamaño de paquetes que recibe, transmite y retransmite, así como del tiempo en que l nodo se encuentra en estado *idle*.

El nivel de energía residual de cada uno al finalizar el tiempo de vida de la red, se muestra en la Figura 23. En ésta, se puede observar que los nodos más cercanos al actor son los que cuentan con un nivel de energía menor, comparado con el de los nodos más alejados al actor. También puede observarse que el nodo 6 es el que cuenta sólo con el 40% de su energía inicial.

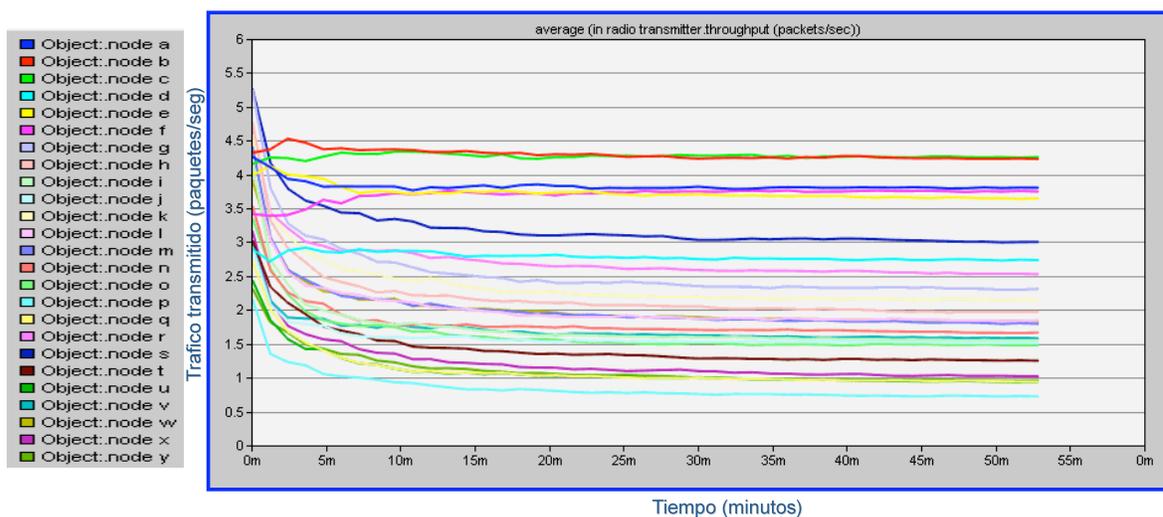


**Figura 23. Energía residual de cada Nodo Sensor al finalizar el tiempo de vida de la red  
WSAN**

El comportamiento en el consumo de energía en cada nodo, depende de la cantidad de paquetes que transmite o recibe así como del tamaño del dichos paquetes (cualquier tipo de paquete) y del tiempo en que el transceptor radio se encuentra en estado *idle* (sin transmitir ni recibir, pero activo). El comportamiento del tráfico recibido y transmitido en cada nodo se muestra en la Figura 24 y Figura 25 respectivamente, las cuales muestran que los nodos a, b, c, d y e son los que reciben y transmiten más paquetes por segundo.



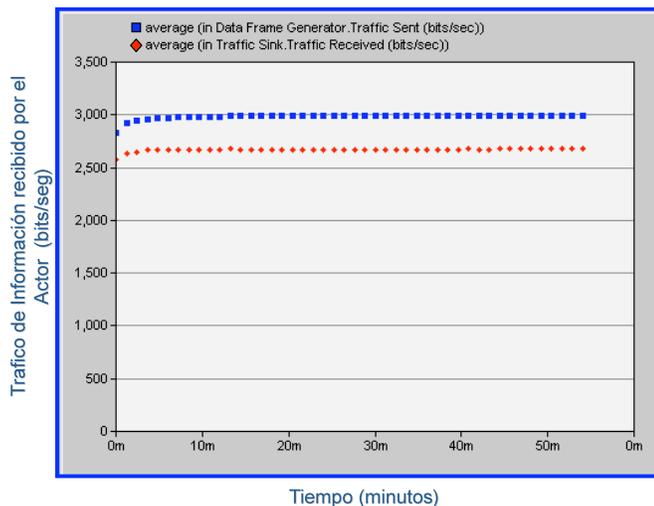
**Figura 24. Tráfico recibido en cada nodo Sensor.**



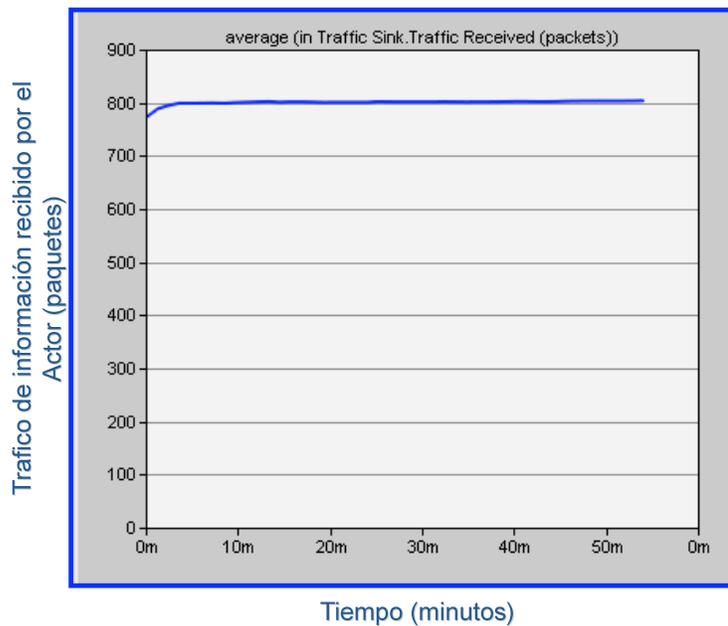
**Figura 25. Tráfico transmitido en cada nodo Sensor.**

En simulación, cada nodo inicia su transmisión de datos en la capa de aplicación a través del módulo *Sensory Data*. Se realizaron simulaciones en el que los nodos generaban simultáneamente paquetes de datos, el resultado fue una pérdida de paquetes muy elevada. Esto debido a la alta tasa de colisiones detectada en capa MAC. Teóricamente el algoritmo de CSMA-CA debe evitar colisiones. Sin embargo, la capa MAC puede elegir intervalos de *backoff* igual para cada nodo, por lo cual intentarán transmitir sus datos al mismo tiempo, provocando colisiones. Debido a colisiones y para evitar pérdida de paquetes, se usó generación no sincronizada de paquetes de datos en los nodos, como ya se ha mencionado

en párrafos anteriores. La cantidad de tráfico de datos en bits/segundo generada de manera global, es decir por todos los nodos en la red y el tráfico recibido por el nodo actor se muestra en la Figura 26. Mientras que en la Figura 27 se muestra el comportamiento que sigue la recepción de paquetes de datos por parte del actor conforme pasa el tiempo.



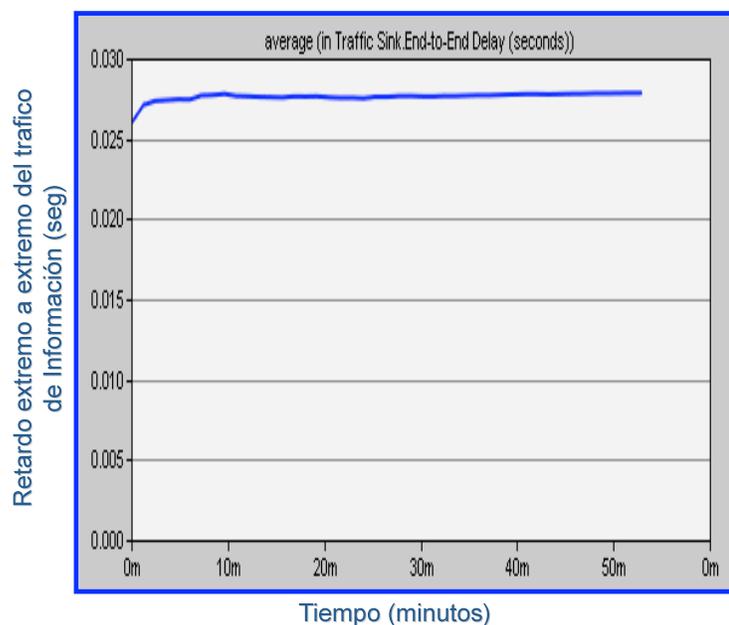
**Figura 26. Tráfico enviado por todos los nodos sensores y tráfico recibido por el Actor**



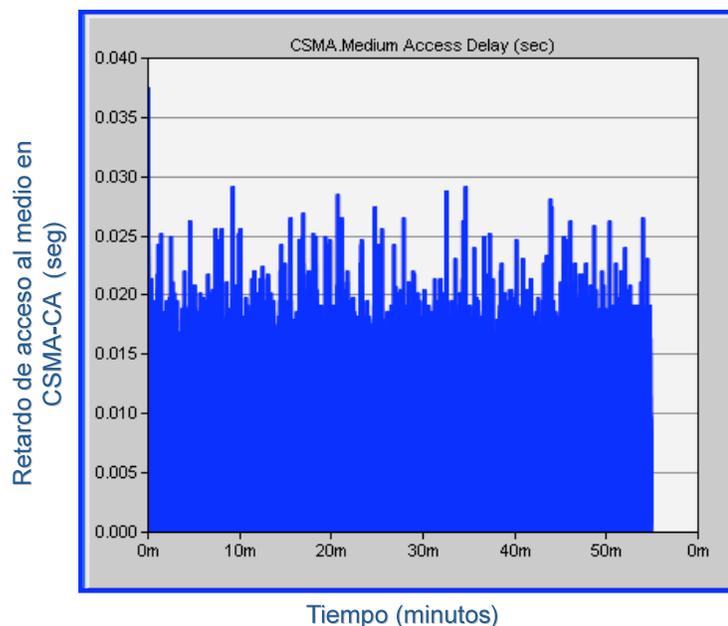
**Figura 27. Número promedio de paquetes de datos recibidos por el Actor.**

En una red WSN una métrica muy importante además del gasto de energía es el tiempo que les lleva a los nodos reportar eventos hacia los actores y el tiempo que estos últimos tienen para reaccionar a dichos eventos en la red. Este trabajo de investigación no considera la coordinación Actor-Actor, por lo que no hay reacción por parte del nodo actor cuando recibe información generada por parte de los nodos sensores. Por lo que únicamente mostramos el retardo extremo a extremo global que le lleva a los nodos enviar paquetes de datos hacia el actor, ver Figura 28. El retardo extremo a extremo es el intervalo de tiempo desde que se genera el paquete de datos en un nodo hasta el momento en que el nodo destino lo recibe. El retardo en la comunicación considera el retardo de acceso al medio en capa MAC y el retardo por la comunicación multi-salto.

La Figura 29 muestra el retardo global de acceso al medio en todos los nodos de la red. Es decir, la suma del retardo de acceso al medio de todos los nodos que componen la red.

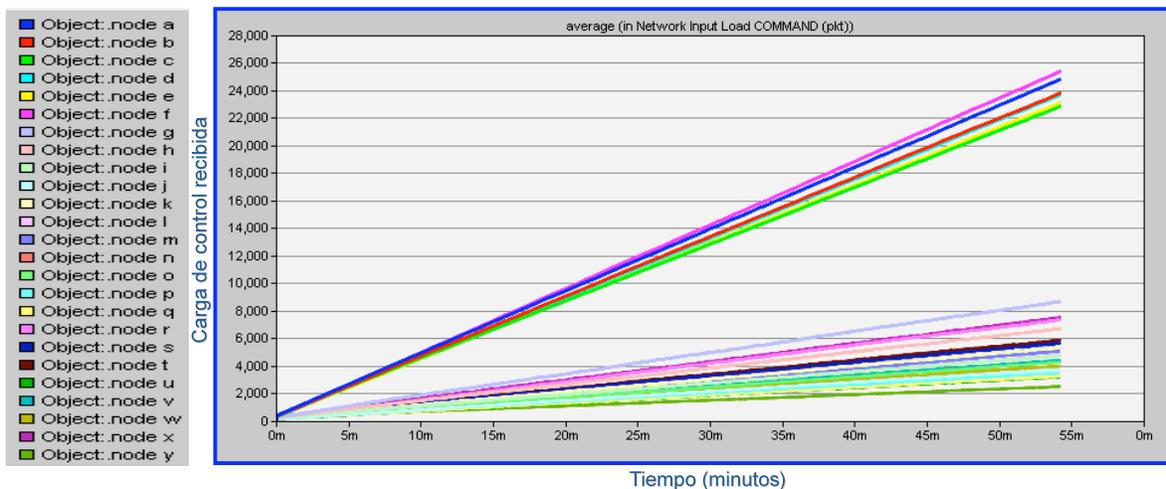


**Figura 28. Retardo extremo a extremo del tráfico de información hasta llegar al Actor.**

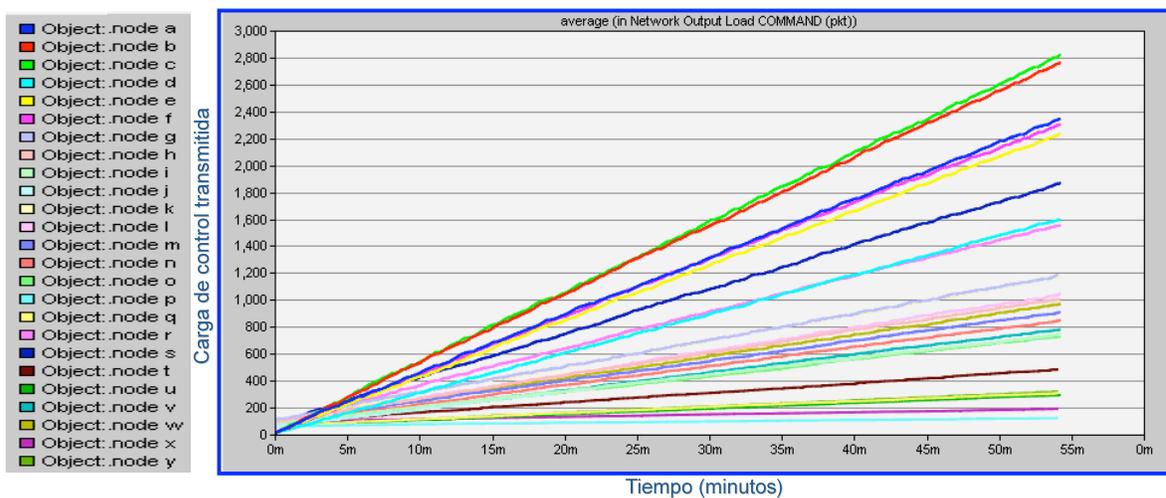


**Figura 29. Retardo de acceso al medio en el mecanismo CSMA-CA**

En el modelo de comunicación usado, todos los paquetes de control que genera el algoritmo de enrutamiento y de agrupamiento son considerados por la capa MAC como tipo de tramas command. La Figura 30 y Figura 31 muestran el número de mensajes de control recibidos y transmitidos por cada nodo sensor en la red. Se observa que los nodos que reciben y transmiten más tramas command son, nuevamente los nodos más cercanos al actor. Esto se debe a que son los que retransmiten los paquetes de datos hacia el actor y en capa de red se genera un reconocimiento cuando se recibe un paquete de datos de algún vecino y éste debe retransmitir. Ese reconocimiento generado en capa de red se considera como trama command en capa MAC. Las tramas de control generadas en capa de red se transmiten en modo *broadcast* por esa razón el comportamiento del tráfico de control recibido es mucho mayor para los nodos que tienen un mayor número de vecinos. El tráfico de control generado por el algoritmo de agrupamiento está considerado en las graficas mostradas, sin embargo no influye de manera sustancial.



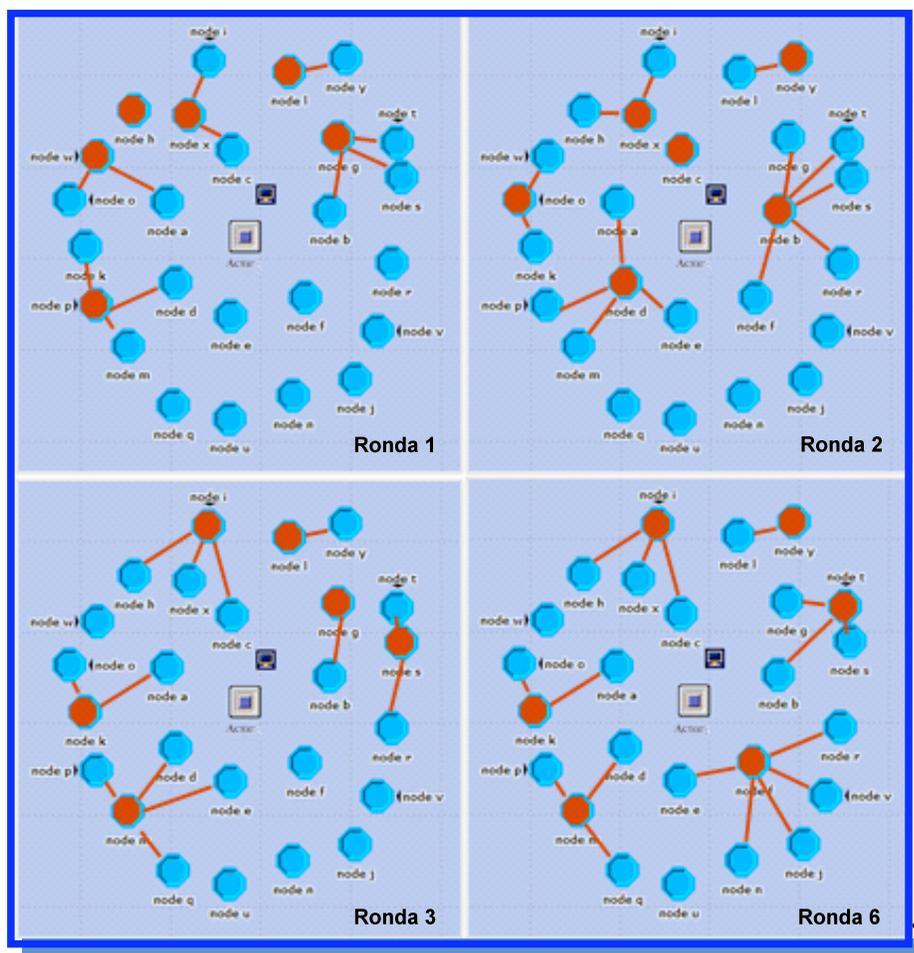
**Figura 30. Carga de Control que recibe cada nodo.**



**Figura 31. Carga de Control que transmite cada nodo**

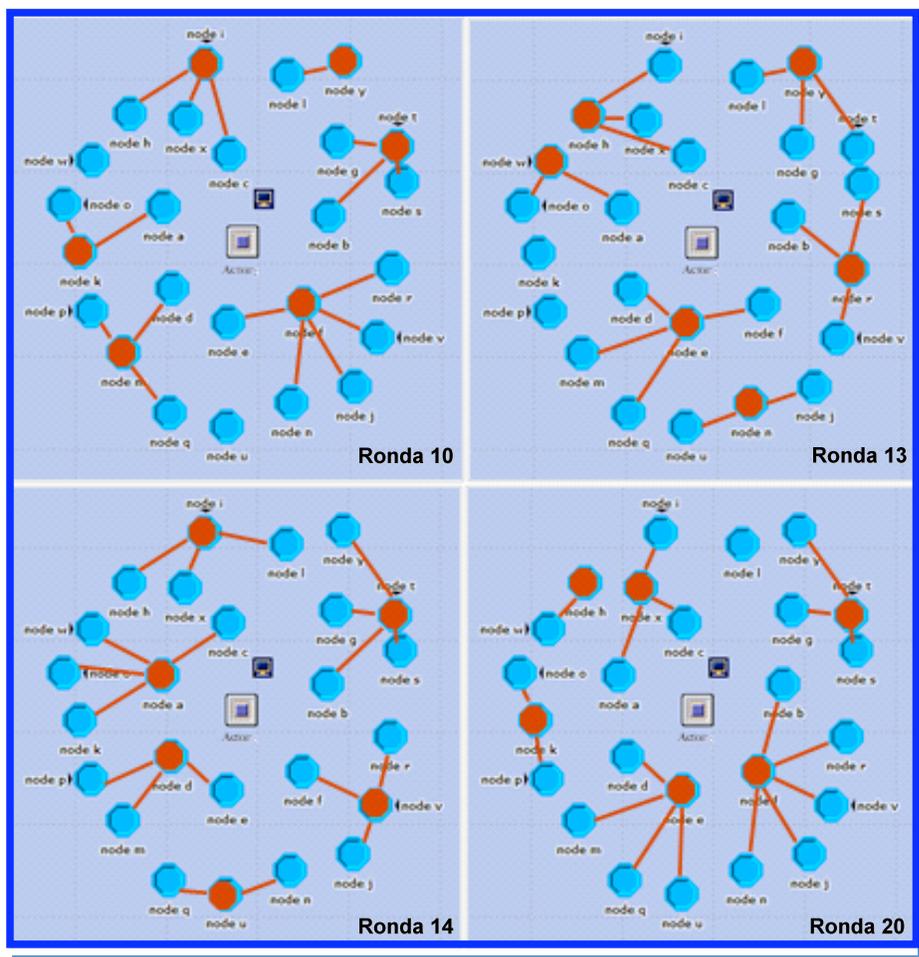
### V.2.1.1 Formación de grupos en WSN

A continuación se muestra el comportamiento de la formación de grupos en diferentes rondas, ver Figura 32 y Figura 33 . En las primeras rondas del algoritmo los nodos electos cabeza de grupo no están distribuidos de manera uniforme, conforme el número de rondas aumenta, la distribución de CH se vuelve más uniforme en la red.



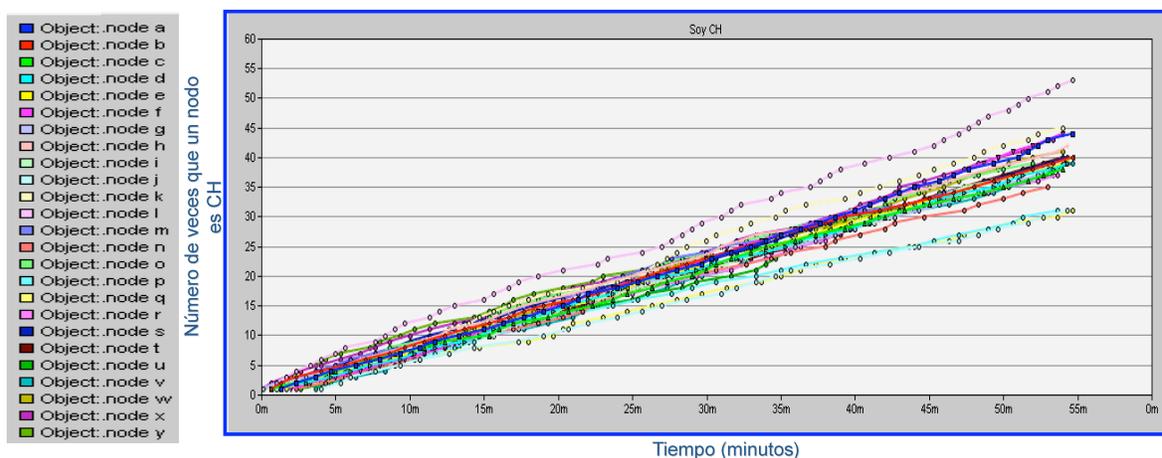
**Figura 32. Topología de agrupamiento de WS-ANT en las rondas 1, 2, 3 y 6.**

Durante la fase de inicialización el nodo actor libera sus hormigas de manera aleatoria. El actor puede elegir aleatoriamente, enviar varias hormigas al mismo nodo vecino y éste elegir aleatoriamente a un vecino que probablemente ya haya recibido una hormiga de otro nodo, por lo que, principalmente en la primera ronda las cabezas de grupo están muy cerca y la mayoría de los nodos no fueron cubiertos por un grupo. A partir de la primera ronda, los nodos ya no eligen aleatoriamente a quien enviarle su hormiga cuando dejan de ser CHs, a partir de esta ronda los nodos CH usarán el rastro de feromonas en sus nodos miembro para enviarle su hormiga. Solamente los nodos que dejan de ser CH y que sus nodos vecinos no lo eligieron como CH por tener a otro más cerca, enviarán su hormiga de manera aleatoria a uno de sus vecinos.

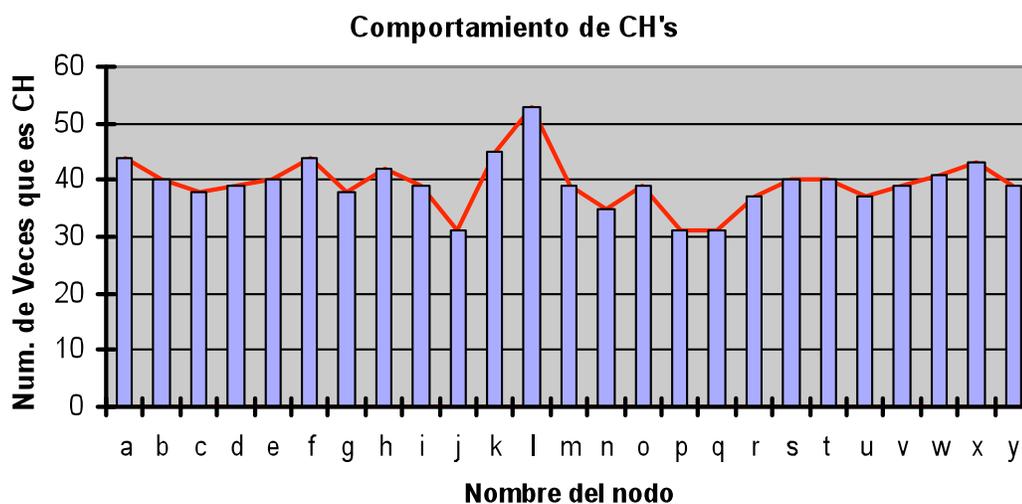


**Figura 33. Topología de agrupamiento de WS-ANT en las rondas 10,13, 14 y 20.**

La elección de cabezas de grupo se hace cada 20 segundos para poder visualizar en un tiempo corto el comportamiento del algoritmo de agrupamiento. La Figura 34 muestra cuantas veces un nodo ha sido cabeza de grupo conforme aumenta el número de rondas, se observa que los nodos tienen un comportamiento parecido en cuanto al número de veces que fungieron como CH durante el tiempo de simulación como se muestra en la Figura 35.

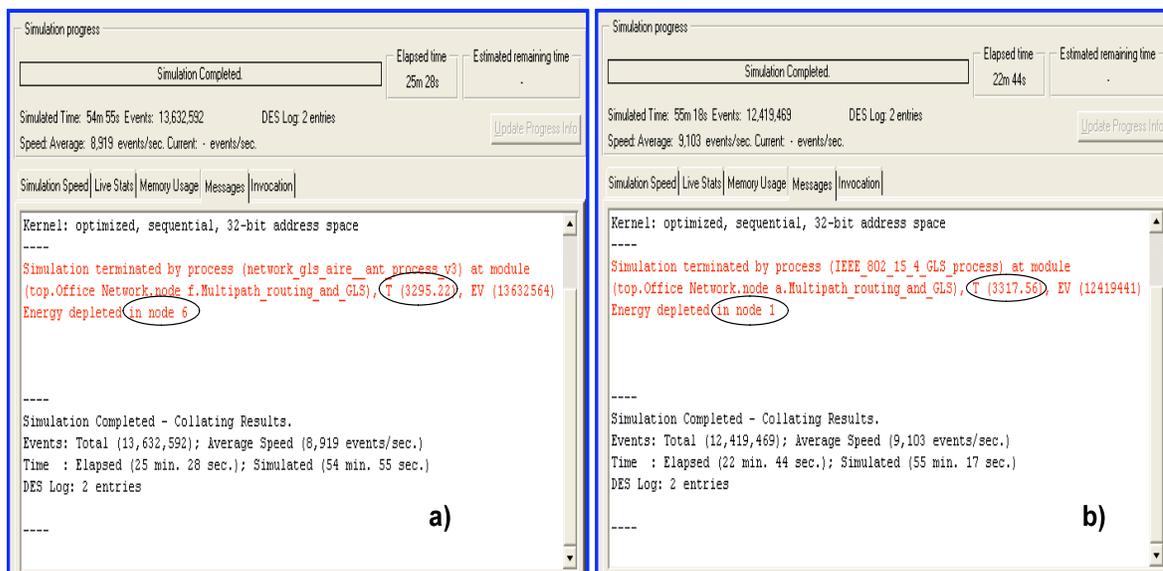


**Figura 34. Comportamiento de elección de CHs en el tiempo**



**Figura 35. Comportamiento de elección de CHs al finalizar el tiempo de vida de la red  
WSAN**

La Figura 36 a) muestra el tiempo de vida de la red que se obtiene al aplicar agrupamiento de nodos sensores, mientras que en Figura 36 b), se muestra el tiempo de vida sin aplicar agrupamiento de nodos para el envío de datos hacia el actor, usando la misma topología de red, ver Figura 19. Para simular el desempeño de la red sin aplicar agrupamiento, se usó el modelo de simulación que se muestra en la Figura 10.



**Figura 36. Tiempo de vida de la red, a) Aplicando agrupamiento, b) sin aplicar agrupamiento**

La comparación en tiempo de vida de la red en la Figura 36, nos muestra que es muy similar y que no se ha obtenido una mejora. Lo anterior se debe a dos razones principalmente, la primera es porque ambos modelos de simulación usan el mismo algoritmo de enrutamiento que es eficiente en energía y la segunda, seguramente más importante, se debe a que es recomendable aplicar agrupamiento en redes WSN o WSNAN que estén compuestas de muchos nodos (cientos) para que el agrupamiento ayude en la comunicación local de la información. En una red pequeña el agrupamiento generaría sobreflujo de control y se formarían grupos no necesarios, ya que la comunicación de la información puede realizarse casi de manera directa hacia el sumidero o actor.

### **V.3 Resumen del Capítulo.**

En este capítulo se mostraron las métricas globales y locales obtenidas en simulación al implementar el modelo de simulación de la propuesta de agrupamiento realizada en este trabajo.

Se muestran métricas globales como el consumo de energía, generación de tráfico de datos, recepción de éstos por el nodo actor, el retardo extremo a extremo en toda la red así como

el tiempo de vida de la red. En cuanto a métricas locales, se han mostrado métricas como el consumo de energía, tráfico total recibido y transmitido por cada nodo, comportamiento del proceso de selección de cabezas de grupo durante el tiempo de vida de la red, entre otras.

Se ha mostrado el desempeño del algoritmo de agrupamiento WS-ANT propuesto en este trabajo de tesis a través de las métricas anteriores. Y se ha mostrado también la comparación del tiempo de vida de la red, aplicando agrupamiento y sin aplicar agrupamiento de nodos.

Es necesario aclarar que a pesar de que la simulación se hizo con un sólo actor, el algoritmo de agrupamiento que se realiza en esta tesis, tanto en el diseño como en la implementación del modelo de simulación, consideran la presencia de varios nodos actores. Esta aclaración se hace porque el escenario de simulación usado, pareciera que es una arquitectura de red WSN con varios nodos y un solo nodo sumidero o Sink. Si se simulara la propuesta con varios nodos actores, la entrega de hormigas y formación de grupos se haría de manera independiente en cada área de acción del actor. Sin embargo el enrutamiento de paquetes hacia distintos actores no podría realizarse debido a que fue diseñado para una red WSN en la que el nodo sumidero forma un árbol de distribución para que los nodos conozcan las rutas por las cuales enviar sus mensajes de datos.

## Capítulo VI

---

### Conclusiones y Trabajo Futuro

---

#### VI.1 Discusión de Resultados

Los resultados de simulación obtenidos describen el principio de funcionamiento así como el desempeño del algoritmo de agrupamiento WS-ANT aplicado en ambiente WSAN propuesto en este trabajo de tesis.

A través de los resultados de simulación se muestra, que puede lograrse una distribución de los nodos cabeza de grupo de manera uniforme en toda la red, esto permite lograr un consumo de energía uniforme también en todos los nodos.

No fue posible comparar los resultados de simulación de la propuesta de agrupamiento WS-ANT con otra propuesta realizada en OPNET para que sea válida dicha comparación. Así que la validación de la propuesta presentada en este trabajo se consigue comparando el tiempo de vida de la red que se obtiene aplicando agrupamiento y sin aplicarlo en la comunicación. Obteniendo que dicho tiempo de vida es muy similar así como el comportamiento general de las diferentes métricas presentadas en el capítulo V. A pesar de que no se ve una mejora sustancial en el tiempo de vida de la red, aplicando agrupamiento, concluimos en que dicha propuesta es efectiva, debido a que los modelo de simulación sin agrupamiento y con agrupamiento usan en capa de red el mismo algoritmo que ya se ha demostrado con anterioridad por los autores que es eficiente en energía. En este sentido, la propuesta de agrupamiento no merma el consumo de energía en los nodos. Por otro lado, se cree que la topología de simulación que se está manejando es muy pequeña y no suficiente para mostrar los beneficios de agrupamiento. Es recomendable aplicar agrupamiento en redes densas compuesta por muchos nodos.

Se está consiente de que es mejor hacer la comparación de resultados del mecanismo de agrupamiento propuesto aquí, con otro mecanismo de agrupamiento que ya haya sido

propuesto para redes WSN y que considere comunicación basado en el estándar IEEE.802.15.4 que además, sea simulado en OPNET, pero hasta el momento no se tiene conocimiento de que ya se haya realizado este tipo de trabajo (hay un mecanismo de agrupamiento a nivel Sensor-Sensor para WSN, pero no fue implementado en OPNET ni bajo el estándar IEEE 802.15.4).

## **VI.2 Conclusiones y Aportaciones.**

El objetivo general de este trabajo de investigación fue el de adaptar un mecanismo de agrupamiento propuesto para redes inalámbricas de sensores para lograr la comunicación eficiente en energía entre nodos sensores y actores, es decir; portarlo en un ambiente WSN. Este objetivo de adaptar el algoritmo a un ambiente WSN se cumplió satisfactoriamente, logrando implementar un algoritmo de agrupamiento dinámico y escalable que usa el principio de inteligencia de enjambres; con respecto a la evaluación del desempeño en términos de eficiencia en energía, se recomienda comparar esta propuesta de agrupamiento con otras publicadas en la literatura. Esta propuesta se basa en el uso de agentes sociales (hormigas) para guiar la elección de los CHs, con lo que se logra una buena distribución de estos nodos en toda la red. Nos referimos a agrupamiento dinámico, porque se rota la función de los nodos CHs y se forman grupos nuevos para distribuir el consumo de la energía, ya que ésta es un recurso muy preciado debido a las características propias de los nodos. De esta forma se prolonga el tiempo de vida de la red.

En la literatura consultada, no se encuentran muchos trabajos de investigación en el área de redes inalámbricas de sensores y actores. Sin embargo, se encontraron algunas propuestas de algoritmos de agrupamiento, la mayoría de éstos se han propuesto para el nivel de coordinación Sensor-Actor, es decir; se forman grupos de sensores en el que el cabeza de grupo o CH es el actor, estos grupos son generalmente a n-saltos. Por otro lado, las propuestas de agrupamiento no incluyen agrupamiento en el nivel de coordinación Sensor-Sensor.

Este trabajo se centró principalmente en el agrupamiento a nivel Sensor-Sensor y se considera el nivel de coordinación Sensor-Actor en cuanto a comunicación de datos de sensores a actor e inicio del algoritmo de agrupamiento por parte del actor.

Con el fin de ahorrar energía, evitamos formar grupos demasiado rápido, razón por la cual la rotación del CH se realiza de acuerdo a una función de feromonas que considera la energía residual de los nodos. En el enrutamiento de paquetes de datos se utiliza un algoritmo que explota el uso de múltiples rutas, esto para evitar tomar las rutas principales cuando se encuentran congestionadas, con esto se espera lograr menores retardos en la coordinación Sensor-Actor. Otro aspecto que ayuda en obtener retardos menores es el hecho de usar una arquitectura automática en la que los nodos busquen informar sobre la ocurrencia de eventos a los actores a través de multi-saltos y no hacia el sumidero.

La implementación de la propuesta de agrupamiento WS-ANT en redes inalámbricas de sensores y actores, se llevó a cabo usando el simulador de redes OPNET, utilizando nodos que soportan la plataforma IEEE 802.15.4 en capa Física y MAC. El modelo de simulación en WS-ANT explota el modo sin Beacon habilitado en capa MAC que fue implementado como parte de este trabajo de tesis, así como el acoplamiento del algoritmo de enrutamiento propuesto el año pasado.

Como resultado de este trabajo de investigación, se participó con la realización del trabajo *Estrategia de agrupamiento biológicamente inspirado para redes inalámbricas de sensores y actores (WSAN)*, (García Tobón, Villaseñor González, 2008).

### **VI.3 Trabajo Futuro**

El diseño de la propuesta se realizó para una topología de red en la que hay varios nodos sensores, unos cuantos actores y un solo nodo sumidero. Sin embargo, la implementación en OPNET, se llevo a cabo con un solo actor y varios nodos sensores, debido como ya se explico anteriormente, a la limitante en el algoritmo de enrutamiento de no formar árboles de distribución por cada nodo actor.

Durante la realización de este trabajo, se da uno cuenta que se pueden integrar varios elementos que en conjunto permitirían un trabajo de investigación completo.

Se propone como trabajo futuro:

- Realizar cambios necesarios en capa de red para su funcionamiento en redes WSN.
- Probar el comportamiento y desempeño del mecanismo de agrupamiento WS-ANT en un escenario de simulación con al menos dos nodos actores.
- Realizar agregación de datos en cada nodo CH. La propuesta es que un nodo CH divida su tiempo de ser CH en diferentes periodos en los cuales obtendrá datos de sus nodos miembro, datos que comprimirá mediante algún algoritmo y después creará un solo paquete de datos que enrutará hacia el actor. Mientras que el Actor debe realizar el proceso inverso, descomprimir la información de manera eficiente, lo cual implica que al descomprimir obtenga la información real que fue enviada por los nodos sensores.
- Agregar Movilidad al menos a los nodos Actores para que se desplacen a realizar una acción por la ocurrencia de un evento en la red.
- Proponer coordinación Actor-Actor para decidir que o cuales actores deben reaccionar cuando surge un evento.
- En cuanto al estándar IEEE 802.15.4, se puede proponer una red basada en Beacon habilitado con CSMA-CA ranurado y mecanismo de asignación de ranuras de tiempo garantizado (Guaranteed Time Slot, por sus siglas en inglés) en topología cluster-tree. La propuesta es que los nodos CH soliciten GTS para enviar datos agregados hacia su actor asociado, sin tener que contender por el canal. Proporcionado con esto QoS en la red.

Realmente, pueden proponerse infinidad de cosas, tanto como la imaginación nos lo permita y la aplicación lo requiera. Puede proponerse por ejemplo Cross-layer para robustez a fallas en los enlaces, seguridad, en cada capa del modelo se pueden implementar varias cosas, etc., todo, para obtener mejores resultados.

## Referencias Bibliográficas

- Akyildiz I. F., y Kasimoglu I., 2004, Wireless sensor and actuator networks: Research challenges. *Ad Hoc Networks Journal Elsevier* 2 (4): 351-367.
- Akyildiz I. F., Su W., Sankarasubramaniam Y., Cayirci E., Agosto 2002, A Survey on Sensor Networks. *IEEE Communications Magazine* 40 (8): 393–422.
- Attia M., Koumba A., Alves M., 2006, Technical Report: Beacon scheduling in cluster-tree IEEE 802.15.4/ZigBee Wireless Sensor Networks, 65 pp.
- Baker D., y Ephremides A., 1981, The architectural organization of a mobile radio network via a distributed algorithm. *IEEE Transactions on Communications* 29 (11): 1694-1701.
- Bandyopadhyay S., Coyle E. J., 2003, An energy efficient hierarchical clustering algorithm for wireless sensor networks. En 22nd IEEE Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM), San Francisco, CA, USA, 30 de Marzo a 3 de Abril, 1713 – 1723.
- Baronti P., Pillai Prashant, Chook V., Chessa S., Gotta A., Y. Fun Hu, 2006, Wireless Sensor Networks: a Survey on the State of the Art and the 802.15.4 and ZigBee Standards. 41 pp.
- Cayirci E., Coplo T., Emiroglu O., 2005, Power Aware Many to Many Routing in Wireless Sensor and Actuator Networks. *Proc. of the 2nd European Workshop on Wireless Sensor Networks (EWSN2005)*, 236- 245.
- Chiasserini C. F., Chlamtac I., Monti P., Nucci A., 2004, An energy-efficient method for nodes assignment in cluster-based ad hoc networks”, *Wireless Networks* 10 (3): 223-231.
- Coates M. J., April 2005, Evaluating Causal Relationships In wireless Sensor/Actuator Networks. McGill University Department of Electrical and Computer Engineering; University St, Montreal, Quebec, Canada, IEEE ICASSP. Marzo 18-23, pp.937-940
- Cunha A., 2007, Technical Report: On the use of IEEE 802.15.4/ZigBee as federating communication protocols for Wireless Sensor Networks, 133 pp.
- Dung V. D., Minh D. V., Hung P. N., Hoa Xuan N., 2005, Wireless Sensor Actor Networks And Routing Performance Analysis. En *Proceedings of the International Workshop on Wireless Ad-hoc Networks*.
- Gallardo Lopez, 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 2007*, Montreal, Québec, Canadá. Mayo 30 a Junio 1, 565 pp.
- García Tobón S., Villaseñor González L. A., 2008, Estrategia de agrupamiento biológicamente inspirado para redes inalámbricas de sensores y actores (WSAN)”,

Workshop on Sensor Networks and Applications WSeNA08, Gramado, Brasil, Septiembre 3-5. 6 pp.

- Genes M., Sorges U., Bouazizi I., Agosto 2002, Ara - the ant-colony based routing algorithm for manets, in: ICPP Workshop on Ad Hoc Networks, 79 - 85.
- Gerla M., y Tsai J. T. C., 1995, Multicluster, mobile, multimedia radio networks. *Wireless Networks*, 1(3): 255–265.
- Gupta G., Younis M., May 2003, Load-balanced clustering of wireless sensor networks, in: *IEEE International Conference on Communications*, pp. 1848-1852.
- Gutierrez Jose A., 2004, *Low-Rate Wireless Personal Area Networks, Enabling Wireless Sensors with IEEE 802.15.4*. Standarsa Information Network IEEE Press, 155 pp.
- Heinzelman W., Chandrakasan A. P., y Balakrishnan H., Octubre 2002, “An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 1 (4): 660–670.
- IEEE 802.15.4 Standard-2003, 2003, "Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low- Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)", IEEE-SA Standards Board, URL: <http://grouper.ieee.org/groups/802/15/pub/TG4b.html/> [Consultada en Noviembre de 2008]
- Kai L., y Jiandong L., 2000, Mobile Cluster Protocol in Wireless Ad Hoc Networks. En *Proc. Intl. Conf. On Commun. Tech. (WCC - ICCT 2000)*
- Kuhn F., Moscibroda T., y Wattenhofer R., September 2004, Initializing newly deployed ad hoc and sensor networks. En *Proceedings of ACM MobiCom 2004*, Philadelphia, PA.
- Lukosius Arturas, 2007, *Opportunistic Routing in Multi-Sink Mobile Ad Hoc Wireless Sensor Networks*, Tesis de Maestria, 91 pp.
- 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*, 99-110.
- Mhatre V., Rosenberg C., Kofman D., Mazumdar R., y Shroff N., Enero 2005, “A minimum cost heterogeneous sensor network with a lifetime constraint. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 4(1): 4–15.
- Ngai E. C. H, Lyu M. R., Liu J., 2005, *A Real Time Communicaction Framework for Wireless Sensor-Actuator Networks*. *IEEE Aerospace Conference*
- Open-ZB, 2007, URL: <http://www.open-zb.net> [consultada en Enero de 2008]
- OPNET Simulator, 2007, URL: <http://www.opnet.com> [consultada en Noviembre de 2008]

- Puigjaner R., 2004, Inteligencia ambiental y redes sensoriales y de actuadores. Conferencia Latinoamericana de Informática. Peru, 27 de Septiembre a 1 de Octubre, URL: <http://clei2004.spc.org.pe/es/skin.php?menu=70&source=html/1007/index.html>
- Ramos V. y Merelo J. J., 2002, Self-organized stigmergic document maps: Environment as mechanism for context learning. En Proc. Spanish Conference on Evolutionary and BioInspired Algorithms, pp. 284–293.
- Ruiz Ibarra E. C., Villaseñor González L. A., 2008, Cooperation Mechanisms for Wireless Sensor and Actor Networks. En Cooperative Wireless Communications, Auerbach Publications, Taylor&Francis Group.
- Sanchez Laguna J. A., septiembre 2006, Algoritmos de encaminamiento Multicast con reducido consumo energético para redes de sensores inalámbricos. Tesis Doctoral, 200 pp.
- Selvakennedy S., Sinnappan S., y Yi Shang, Oct. 2007, A Biologically-Inspired Clustering Protocol for Wireless Sensor Network., Elsevier Computer Communications, 30 ( 14-1): 2786-2801.
- Shah G. A., Bozyigit M, Akan OB, Baykal B., 2006, Real Time Coordination and Routing in Wireless Sensor and Actuator Networks. Proc. 6th International Conference on Next Generation Teletraffic and Wired/Wireless Advanced Networking (NEW2AN).
- Shu T., Krunz M., Vrudhula S., May 2005, Power balanced coverage-time optimization for clustered wireless sensor networks. En: 6th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing, 111-120.
- Sinem Coleri Ergen, 2004, “ZigBee/IEEE 802.15.4 Summary”, 35 pp.
- Subramanian D., Druschel P., Chen J., 1997, Ants and reinforcement learning: A case study in routing in dynamic networks. International Joint Conference on Artificial Intelligence, Morgan Kaufmann, 832-838.
- Vassis D., Kormentzas G. T., Skianis C., February 2005, Performance evaluation of single and multi-channel actor to actor communication for wireless sensor actor networks. Ad Hoc Networks, Elsevier Science, 4 (4): 487-498
- Verdone R., Dardari D., Mazzini G. y Conti A., 2008, Wireless Sensor and Actor Networks. Academic Press, 361 pp.
- Yuan H., Huadong M., Hongyu L., 2006, Coordination Mechanism in Wireless Sensor and Actuator Networks. First International Multi-Symposiums on Computer and Computational Sciences - IMSCCS'06, 627-634.
- Younis O. y Fahmy S., 2004, Heed: A hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks, IEEE Transactions on Mobile Computing 3 (4): 366 – 379.
- ZigBee Alliance, 2005 "ZigBee Specification", Document 053474r05, Version 1.0, 14th of December 2004. Available (since June 2005), URL: <http://www.zigbee.org/>, [Consultada en Febrero 2005]

---

## **Anexo A. El Estándar IEEE.802.15.4**

---

El grupo de trabajo IEEE 802.15.4 ha definido tres clases de WPANs (Wireless Personal Area Networks, por sus siglas e Inglés) que se diferencian por: la tasa de datos, drenado de la batería y QoS. La WPAN de alta velocidad de datos (IEEE 802.14.3) es conveniente para aplicaciones multimedia que requieren alta QoS. Las redes WPAN de mediana tasa de datos (estándar IEEE 802.15.1/Bluetooth) son diseñadas como reemplazos de cables para dispositivos electrónicos concentrados en teléfonos móviles, y PDAs con QoS apropiada para aplicaciones de voz. La última clase de WPAN, LR-WPAN (Estándar IEEE 802.15.4), se define para aplicaciones habilitadas sólo por baja potencia y bajo costo de requerimientos que no son designados para los dos primeros tipos de redes WPAN.

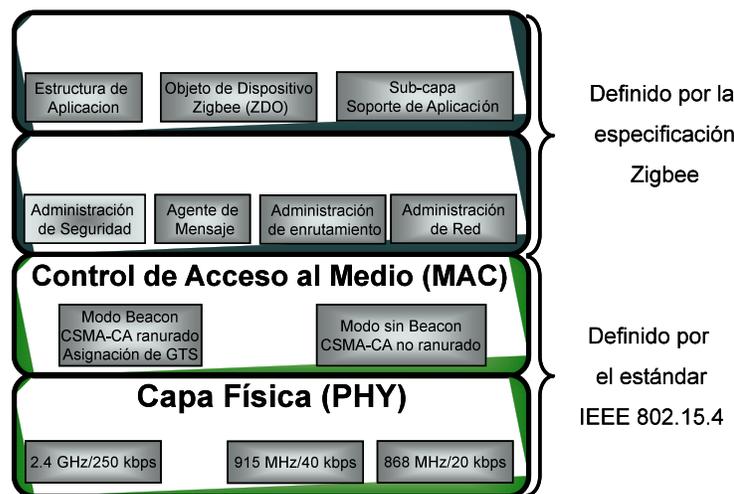
Las aplicaciones de LR-WPAN (o PAN) tienen una necesidad de baja velocidad de datos y baja calidad de servicio (QoS). La intención del estándar IEEE 802.15.4 no es competir con otras tecnologías de red inalámbricas (Gutierrez, 2004), sino complementar el rango de tecnologías inalámbricas disponibles. Las ventajas de las redes LR-WPAN son la fácil instalación, fiabilidad en transferencia de datos, rango de operación corto, extremadamente de bajo costo y tiempo de batería razonable, mientras se mantiene una pila de protocolos simple y flexible (Baronti, et al., 2006).

El grupo de trabajo (TG4) IEEE 802.15.4 (IEEE 802.15.4 Standard-2003, 2003) junto con la alianza Zigbee<sup>3</sup> (ZigBee Alliance, 2005), han desarrollado una pila de protocolos completa, para redes LR-WPAN. El estándar IEEE 802.15.4 define la capa física (PHY) y

---

<sup>3</sup> La alianza Zigbee es una asociación de compañías que trabajan para desarrollar estándares (y productos) para redes inalámbricas fiables, de baja potencia, bajo costo.

capa de control de acceso al medio (MAC) para las redes LR-WPAN, mientras que la especificación Zigbee define los protocolos para capas superiores a IEEE 802.15.4, es decir; la capa de red (NWK) y la capa de aplicación (APL) para proveer una pila de protocolos, para comunicaciones de bajo costo, baja potencia y baja tasa de datos.



*Figura 37. Arquitectura de la pila de protocolos IEEE 802.15.4/Zigbee*

## A.1 Componentes de Red

En el estándar IEEE 802.15.4 se especifican tres tipos de dispositivos o nodos.

- **Coordinador PAN**

Es el controlador principal de la red, el cual identifica su red PAN. Inicia y configura la formación de la red, se encarga de proveer servicios de sincronización global a otros nodos en la red a través de la transmisión de tramas Beacon, que contienen el ID de la red, ID del coordinador PAN, estructura de la supertrama y otra información relevante. Es único en la red, con esta funcionalidad. Es un dispositivo FFD (Full Funcional Device), es decir contiene el conjunto completo de servicios MAC<sup>4</sup>.

- **Coordinador**

---

<sup>4</sup> Un dispositivo FFD puede operar como un coordinador PAN o como un dispositivo de red.

Tiene las mismas funcionalidades que el coordinador PAN, excepto que no incorpora la funcionalidad de formación de red. Un nodo Coordinador se asocia al coordinador PAN y provee sincronización local a otros nodos que se encuentran dentro de su rango de transmisión, esto lo logra por medio de transmisiones de tramas Beacon<sup>5</sup> que le indican a los nodos en su vecindario el ID de la PAN definida por el coordinador PAN al cual se asoció. Este dispositivo no se usa en topología estrella. En topología árbol, un Coordinador puede asociarse a otro Coordinador asociado previamente al Coordinador PAN y participar en enrutamiento de mensajes multi-salto. Es un dispositivo FFD y puede haber varios nodos en la red.

- **Dispositivo Final**

Es un nodo que no permite a otros dispositivos asociarse con él, como en el caso de los nodos Coordinadores. Este tipo de dispositivo no participa en el enrutamiento. Se asocia al coordinador PAN o a un Coordinador como un esclavo que se sincroniza con otros dispositivos dentro de la red. Es un dispositivo RFD (Reduced Function Device) implementa un subconjunto reducido de la pila de protocolos (Cunha, 2007). Los RFDs permiten la implementación de dispositivos extremadamente simples que requieren recursos mínimos en términos de potencia de procesamiento y capacidad de memoria. Estas características tienen un impacto directo en la implementación de dispositivos de bajo costo para permitir aplicaciones tales como interruptores de luz

## A.2 Topologías de Red

Se han definido dos topologías de red en el estándar IEEE 802.15.4, la topología estrella y malla.

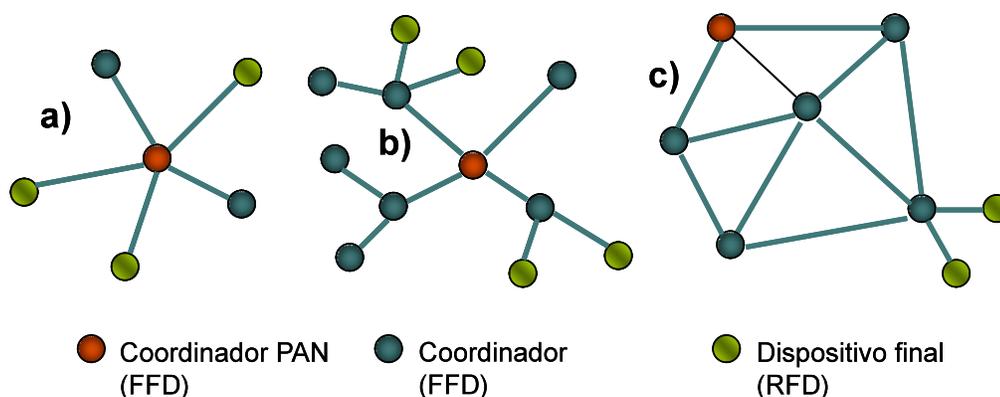
La **topología en estrella** se forma alrededor del nodo Coordinador PAN, con un grupo de nodos RFD's La comunicación es centralizada, por lo que esta topología no es adecuada para redes WSN tradicionales por dos razones:

---

<sup>5</sup> El Coordinador solo comienza a transmitir tramas beacon una vez que se ha asociado al Coordinador PAN.

- Un nodo sensor seleccionado como Coordinador PAN arruinará sus recursos de batería rápidamente. Sin embargo, debido al consumo de potencia en las tareas del Coordinador PAN en la topología estrella, el estándar IEEE 802.15.4 recomienda que este sea administrado con mayor energía que los demás nodos.
- La cobertura de un cluster IEEE 802.15.4 es limitada, teniendo el problema de escalabilidad en una red WSN grande (Attia, ET AL., 2006).

La **topología en malla** también incluye un Coordinador PAN. En contraste con la topología estrella, la comunicación es descentralizada, aquí cada nodo puede comunicarse con cualquier otro en su rango de cobertura. Básicamente esta topología opera en forma ad-hoc, autoorganizada y auto manejada (Sinem, 2004). Topología que puede ser más eficiente en potencia y uso de la batería, en comparación con una red estrella.



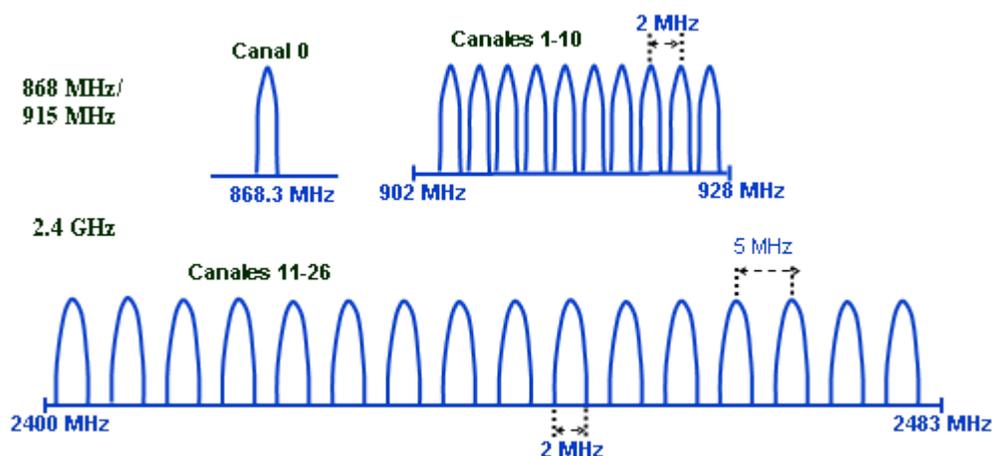
**Figura 38. Topologías de red: a) estrella, b) en árbol, c) malla**

La *topología en árbol* es una red más compleja y puede ser implementada en redes IEEE 802.15.4. Pero no es parte de la especificación. El estándar no define como se construye, sólo indica que es posible y que puede iniciarse por capas superiores (Sinem, 2004). Una topología en árbol utiliza una estructura jerárquica de grupos de nodos y puede considerarse como un caso especial de la topología en malla. Los nuevos coordinadores (número máximo de coordinadores o routers hijos definido por  $R_m$ , en el estándar Zigbee) que se asocian a la red, son nombrados por el coordinador PAN (único en la red), el cual es la cabeza de grupo (CH) del primer grupo formado con identificador de grupo CID=0 que difunde un mensaje Beacon a sus nodos vecinos y que dará un identificador de cabeza de

grupo a los nodos coordinadores que eligió para que puedan formarse otros clusters, los nuevos coordinadores difundirán sus Beacons y los nodos que los escuchen se asociaran a uno de estos como esclavos una vez que sean aceptados (Cunha, 2007).

### A.3 Capa Física IEEE 802.15.4

El estándar ofrece tres bandas operacionales de frecuencias: 2.4 GHz, 915 MHz y 868 MHz, las cuales están divididas en 27 canales, ver Figura 39. Hay un solo canal entre 868 y 868.6 MHz, 10 canales entre 902 y 928 MHz, y 16 canales entre 2.4 y 2.4835 GHz (Attia, ET AL., 2006).



*Figura 39. Bandas de frecuencia de operación.*

Las frecuencias bajas son más adecuadas para transmisiones con rangos más grandes debido a las bajas pérdidas de propagación. La ventaja de las transmisiones de alta velocidad es que proveen un caudal eficaz más alto (throughput, en inglés), baja latencia o bajos ciclos de trabajo. Todas estas bandas de frecuencias están basadas en la técnica de esparcimiento DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum, por sus siglas en inglés) las características de cada banda de frecuencia; como tipo de modulación, tasa de chip o bit, se muestran en la Tabla III.

*Tabla III. Bandas de frecuencia y velocidades de datos.*

PHY (MHz)	Banda de frecuencia (MHz)	Parámetros de ensanchado		Parámetros de datos			
		Tasa de chips (kcps)	Modulación	Tasa de bit (kbps)	Tasa de símbolo (símbolo/s)	Periodo de símbolo ( $\mu$ s)	Símbolos
868/915	868-868.6	300	BPSK	20	20	49	Binario
	902-928	600	BPSK	40	40	24	Binario
2450	2400-2483.5	2000	O-QPSK	250	62.5	16	16-ari ortogonal

La capa Física IEEE 802.15.4, además de ser la responsable de la transmisión y recepción de datos, realiza las siguientes tareas:

**Activación y desactivación del radio transceptor:** el radio transceptor puede operar en uno de estos tres modos: Transmitir, Recibir o Dormir.

**Detección de energía de recepción (ED: Receiver Energy Detection):** la capa Física debe realizar una estimación de la potencia de la señal recibida dentro del ancho de banda de un canal IEEE 802.15.4. Esta medición se usa para determinar si el canal está ocupado o no como parte del procedimiento de disponibilidad del canal CCA (Clear Channel Assessment, por sus siglas en inglés) o por el algoritmo de selección del canal de la capa de Red.

**Indicación de la calidad del enlace (LQI: Link Quality Indication):** La medición de LQI es una caracterización de la potencia y/o calidad de un paquete recibido. El LQI puede implementarse al usar la técnica ED, una estimación señal a ruido o una combinación de ambas.

**Valoración de disponibilidad del canal (CCA: Clear Channel Assessment):** Mediante esta función es posible reportar el estado de actividad del medio, es decir; libre u ocupado. El CCA se realiza en tres modos de operación:

- **Modo de detección de energía:** el CCA reporta que el medio está ocupado si la energía recibida se encuentra arriba de un umbral específico, referido como umbral ED.
- **Modo de sensado de portadora:** el CCA reporta que el medio se encuentra ocupado sólo si detecta una señal con las características de modulación y esparcimiento IEEE 802.15.4 y esa señal puede ser más alta o más baja que el umbral ED.
- **Modo de sensado de portadora con detección de energía:** ésta es una combinación de las técnicas ya mencionadas. El CCA reporta que el medio está ocupado sólo si detecta una señal con las características de modulación y esparcimiento IEEE 802.15.4 y con la energía recibida arriba del umbral ED.

**Selección de frecuencia de canal:** como ya se ha mencionado el estándar IEEE 802.15.4 define 27 diferentes canales inalámbricos. De ésta forma una red puede operar dentro de ese conjunto de canales. La capa física debe ser capaz de sintonizar su transceptor en un canal específico.

#### **A.4 Capa MAC IEEE 802.15.4**

La capa de acceso al medio ofrece: administración del Beacon, acceso al canal, administración del mecanismo GTS (Guaranteed Time Slot, por sus siglas en Inglés), validación de tramas, entrega de tramas de reconocimiento, asociación y des-asociación de la red.

El protocolo IEEE 802.15.4 puede operar en dos modos.

Sin habilitación de Beacon usando el mecanismo CSMA-CA (Carrier Sense Multiple Access-Collision Avoidance) no ranurado. El segundo modo es con Beacon habilitado, en el cual un dispositivo central (Coordinador PAN o Coordinador Zigbee) envía Beacons periódicamente, para sincronizar nodos que se asocian con él y para identificar a la red PAN. Usa el mecanismo CSMA-CA ranurado y con el mecanismo adicional GTS (Guaranteed Time Slot) para nodos que requieren servicios garantizados. La dirección mac

puede tener una longitud de 64 bits o una dirección corta de 16 bits, dependiendo del modo de direccionamiento.

## A.4.1 Modo Beacon habilitado y CSMA-CA Ranurado

### A.4.1.1 Estructura de la supertrama

La estructura de la supertrama se utiliza cuando la capa MAC opera en modo Beacon habilitado. La trama Beacon delimita el inicio y fin de una supertrama, definiendo el intervalo de tiempo en que las tramas son intercambiadas entre diferentes nodos en la red PAN (Sinem, 2004). El Coordinador PAN es quien define el formato de la supertrama.

La supertrama puede tener un periodo activo en el que se permiten las transmisiones de datos y un periodo inactivo. Durante el periodo inactivo el coordinador no debe interactuar con su PAN y puede entrar en modo de baja-potencia (ahorro de energía), mientras la porción activa consiste de un periodo de acceso por contención o CAP (Contención Access Period, por sus siglas en Inglés) y un periodo libre de contención o CFP (Contention Free Period, por sus siglas en Inglés).

Cualquier dispositivo de red que desee comunicarse durante el CAP deberá competir con otros dispositivos usando el mecanismo CSMA-CA ranurado. El CFP empieza inmediatamente después del CAP contiene ranuras de tiempo garantizadas (GTS), las cuales aparecen al final de la porción activa. El Coordinador PAN es responsable de asignar GTSs. Puede asignar hasta 7 GTS y cada GTS puede ocupar más de una ranura de tiempo.

La duración de la porción activa e inactiva son descritas por el valor de BO (Beacon Order) y de SO (Superframe Order) El parámetro BO se utiliza para definir el intervalo en el cual el coordinador debe transmitir sus tramas s Beacon.

El *Beacon Interval* BI, se relaciona con BO como sigue:

$$BI = (aBaseSuperframeDuration)2^{BO}, \quad 0 \leq BO \leq 14^6 \quad \text{Ec 1}$$

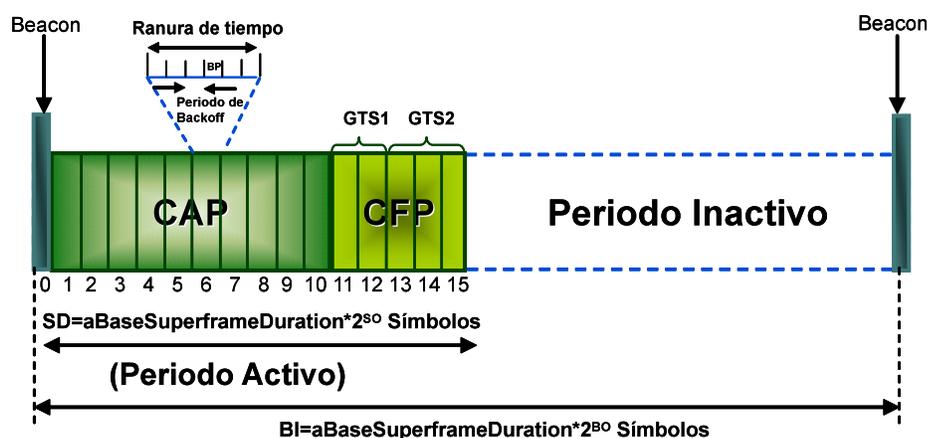
---

<sup>6</sup> La supertrama será ignorada si BO=15.

El parámetro  $SO$  se utiliza para definir la longitud de la porción activa de la supertrama. La duración de la supertrama  $SD$ , es relacionada con  $SO$  como sigue:

$$SD = (aBaseSuperframeDuration)2^{SO}, \quad 0 \leq SO \leq BO^7 \quad \text{Ec 2}$$

En la Ec 1 y Ec 2 anteriores  $aBaseSuperframeDuration$  denota la duración mínima de la supertrama cuando  $SO=0$ . Ésta duración se fija a 960 símbolos (IEEE 802.15.4 Standard-2003, 2003) correspondiente a 15.36 ms (considerando una tasa de 250 kbps en la banda de 2.4 GHz) y cada ranura de tiempo tiene una duración de 0.96 ms. La porción activa de cada supertrama se divide en 16 ranuras de tiempo igualmente espaciadas como se ve en la Figura 40.



*Figura 40. Estructura de Supertrama.*

El beacon contiene diferentes parámetros relacionados a la supertrama, tal como el  $BO$ ,  $SO$ , extensión del tiempo de batería, el ID del Coordinador PAN, ID de la PAN, campos relacionados a los GTSS, entre otros. El Beacon se transmite al inicio de la ranura 0 sin usar CSMA. El CAP comienza inmediatamente después del Beacon. El CAP debe tener al menos  $aMinCAPLength$  símbolos salvo que se necesite espacio adicional para acomodar

<sup>7</sup> La supertrama no permanecerá activa después del beacon, si  $SO=15$

temporalmente el incremento en la longitud de la trama Beacon para realizar mantenimiento GTS.

La capa MAC soporta tramas DATA (datos), ACK (reconocimiento), Beacon y Command. Todas las tramas son usadas para una comunicación fiable. La entrega de datos se asegura usando tramas ACK, estas tramas son transmitidas en respuesta a cada paquete recibido que tenga la bandera de petición de reconocimiento habilitada. Todas las tramas excepto las tramas ACK y Beacons deben usar CSMA-CA ranurado para acceder al canal.

#### **A.4.1.2 Mecanismo CSMA-CA ranurado**

El modo con Beacon habilitado, usa la estructura de la supertrama en la red PAN y requiere utilizar el mecanismo CSMA-CA ranurado. Este mecanismo se implementa usando unidades de tiempo llamados periodos de *backoff*, donde un periodo de *backoff* es igual a  $unitBackoffPeriod=20$  símbolos. Ésta es la unidad de tiempo básica del protocolo MAC y el acceso al canal puede ocurrir sólo en un límite de estos periodos. En el mecanismo CSMA-CA los límites del periodo de *backoff* de cada dispositivo en la red se alinean con los límites de las ranuras de tiempo de la supertrama del Coordinador PAN. De tal forma que cada vez que un dispositivo desee transmitir tramas de datos durante el CAP, debe localizar el límite del siguiente periodo de *backoff*.

El mecanismo CSMA usa tres variables: *NB*, *CW* y *BE*. Donde *NB* es el número de veces que el algoritmo CSMA-CA requiere retraerse mientras intenta una transmisión. *CW* es la longitud de la ventana de contención, y define el número de periodos de *backoff* que necesita estar libre de actividad antes de que una transmisión pueda comenzar. *BE* es el exponente de *backoff*, está relacionado el número de periodos de *backoff* que un dispositivo debe esperar antes de intentar evaluar la disponibilidad del canal.

En CSMA-CA ranurado, cuando la extensión de batería está habilitado, entonces *BE* se pone al mínimo valor de  $(2, macMinBE)$ , de lo contrario se pone a *macMinBE*. El algoritmo CSMA-CA comienza con la inicialización de las tres variables (paso 1) El algoritmo entonces localiza un límite del periodo de *backoff* y empieza un retardo aleatorio para evitar colisiones. Ese retardo se elije aleatoriamente de 0 a  $2^{BE}-1$  unidades de *backoff* (paso 2).

Después se hace una petición a la capa física para que realice el CCA en el límite del periodo de *backoff* justo después de que expiro el periodo de *backoff* (paso 3). La sub-capa MAC debe entonces proceder en caso de que resten pasos del algoritmo CSMA-CA, la transmisión de la trama, y cualquier reconocimiento puede completarse antes de que termine el CAP, si la sub-capa MAC no puede proceder, entonces debe esperar hasta que el CAP comience en la próxima supertrama y repita la evaluación. Si la evaluación del canal es que se encuentra ocupado (paso 4), entonces la sub-capa MAC debe incrementar NB y BE, asegurándose siempre que BE no sea mayor que  $aMaxBE$ . CW puede también volver a tomar el valor de 2 si NB es menor o igual a  $macMaxCSMABackoffs$ , el algoritmo CSMA-CA debe regresar al paso 2, si NB excede el valor  $macMaxCSMABackoffs$ , se indica como una falla. Cuando la falla ocurre, la capa MAC destruye el paquete actual e indica de esta falla a capas superiores como una falla de enlace. Si el acceso al canal está libre (paso 5), entonces la sub-capa MAC debe asegurarse que CW disminuya su valor en uno y esto se repite hasta que  $CW=0$ . Si en este punto el canal aun está libre, entonces comienza la transmisión inmediatamente del paquete que se encontraba en espera. En la Figura 41 se muestra el algoritmo CSMA-CA completo (Cunha, 2007).

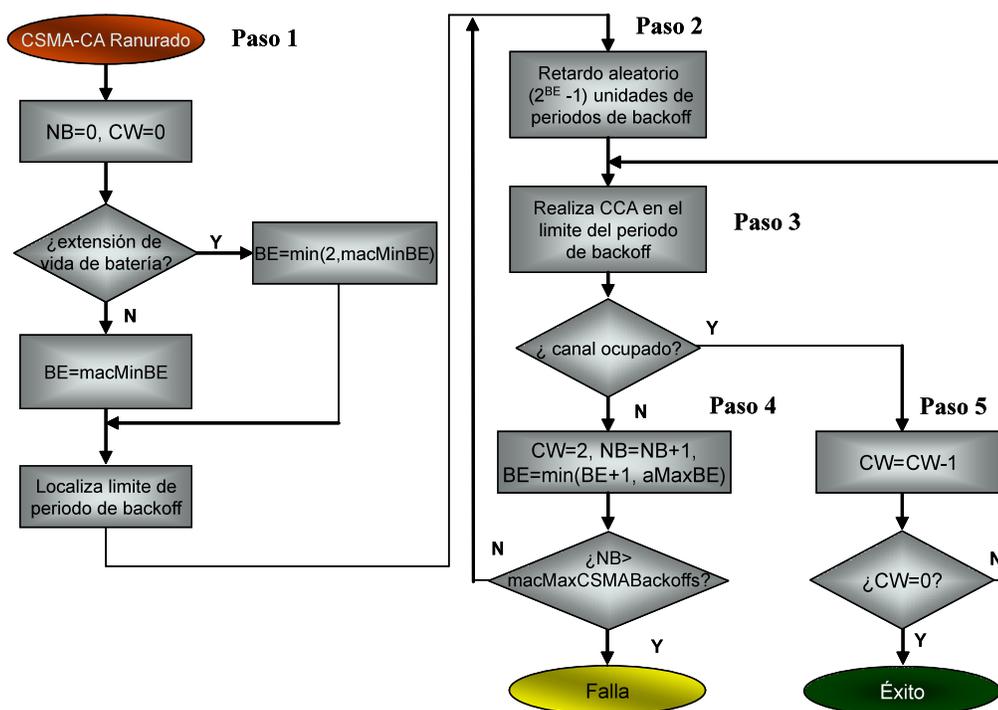
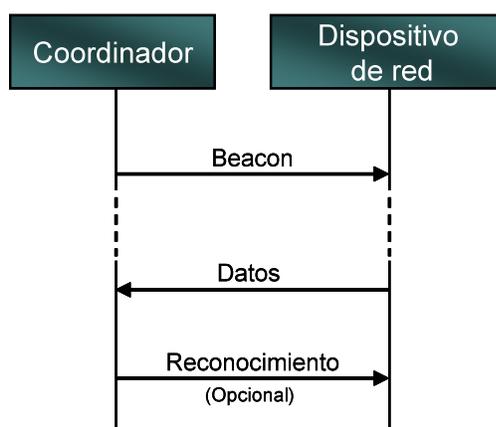


Figura 41. El algoritmo CSMA-CA ranurado

#### A.4.1.3 Modelo de transferencia de datos

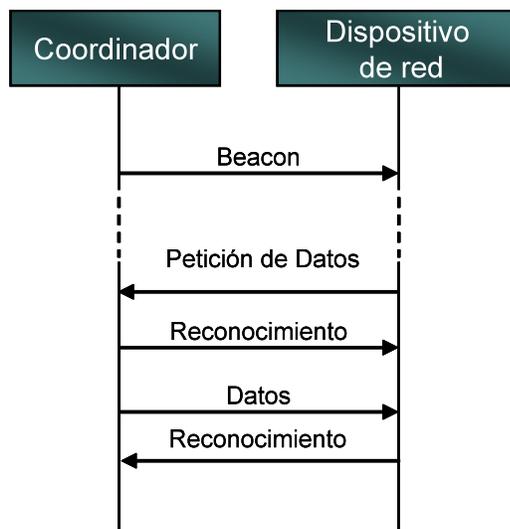
En una red estrella con Beacon habilitado, un dispositivo de red (dispositivo final) que desea enviar datos a su coordinador PAN, primero debe escuchar el Beacon. En caso de que no tenga asignada una ranura de tiempo garantizado GTS, el dispositivo transmite sus tramas de datos en el periodo de acceso por contención CAP a través del uso del mecanismo CSMA-CA ranurado. Por otro lado, si el dispositivo tiene asignado un GTS, espera por la ranura de tiempo apropiada dentro de la estructura de la supertrama para transmitir sus tramas de datos.

Cuando el coordinador Pan recibe tramas de datos, este envía un reconocimiento (opcional) hacia el dispositivo de red, aquí termina la transferencia de datos (Gutierrez, 2004).



**Figura 42. Transferencia de datos de un dispositivo de red hacia el Coordinador PAN- modo Beacon habilitado en topología estrella.**

Cuando el Coordinador PAN desea transferir datos al dispositivo, este le indica al dispositivo a través del Beacon que el mensaje de datos está pendiente. El dispositivo periódicamente escucha el Beacon y si un mensaje está pendiente, transmite una trama mac tipo Command pidiendo este dato. El coordinador le envía un reconocimiento en respuesta a la trama comando recibida y después transmite la trama de datos pendiente usando CSMA-CA ranurado hacia el dispositivo, finalmente la transacción se termina con un reconocimiento que envía el dispositivo de red (Sinem, 2004). La secuencia de este proceso se muestra en la Figura 43.



**Figura 43. Transferencia de datos de un coordinador PAN hacia un dispositivo de red- modo Beacon habilitado en topología estrella.**

La topología estrella puede verse como una red de un solo grupo o cluster, formado por un controlador central (Coordinador PAN) y varios nodos hijos. En modo con Beacon habilitado, solo los nodos en el vecindario del Coordinador PAN pueden sincronizarse. Sin amargo, el estándar IEEE 802.15.4/Zigbee también permite a otros nodos (Coordinadores o Routers Zigbee) designados por el Coordinador PAN formar nuevos clusters y enviar tramas Beacon para sincronizar nodos que se unen a la red a través de ellos (topología en árbol). Si las tramas Beacon se generan de manera no organizada, pueden colisionar con otras, incluso con tramas de datos. Como consecuencia de colisiones, los nodos pueden perder la sincronización con sus coordinadores, lo que les impedirá comunicarse. Por lo que, es necesaria una calendarización del Beacon para evitar completamente las colisiones de tramas Beacon para asegurar servicios de sincronización seguros y fiables.

Construir una red multi-salto en topología árbol es bastante conveniente para soportar QoS en redes WSN debido al mecanismo GTS<sup>8</sup>. La especificación IEEE 802.15.4/Zigbee habla

---

<sup>8</sup> Las especificaciones IEEE 802.15.4/Zigbee restringen la sincronización en el modo Beacon habilitado a las redes en topología estrella y soportan redes multi-salto usando topología malla sin sincronización, es decir en modo sin Beacon habilitado.

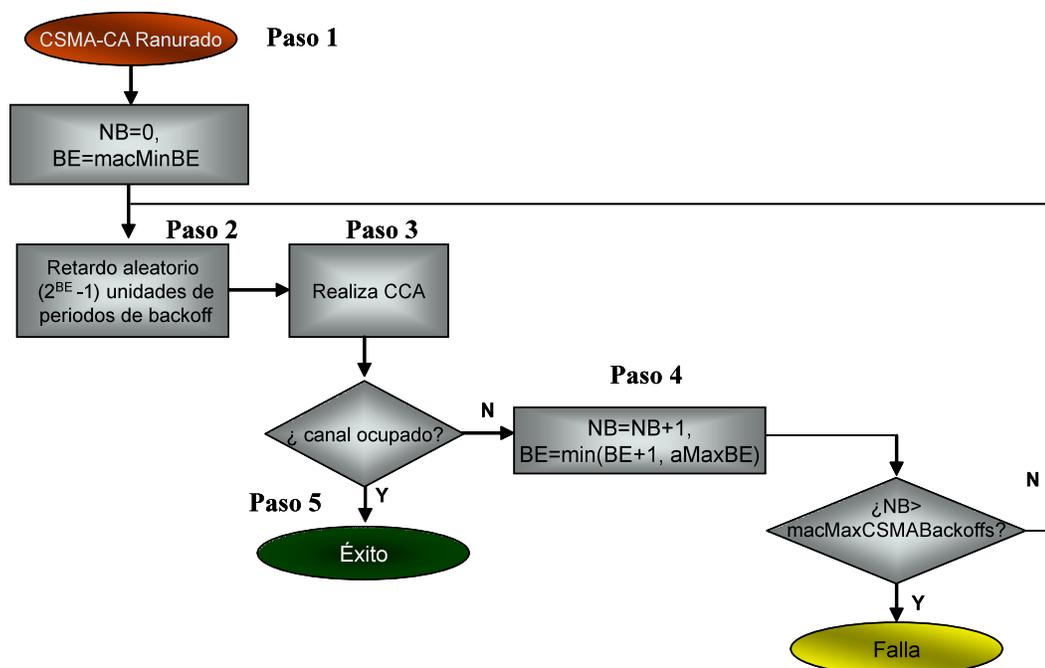
acerca de la posibilidad de usar topología árbol, la cual combina multi-salto y sincronización, pero la descripción de cómo construirla de manera adecuada aun hace falta, por esa razón en (Attia, ET AL., 2006) realizan un reporte de cómo manejar los Beacon enviados por el Coordinador PAN y los nodos Coordinadores o routers hijos y de acuerdo a eso el manejo de la estructura de la supertrama en los grupos.

## **A.4.2 Modo sin Beacon habilitado y CSMA-CA no Ranurado**

### **A.4.2.1 Mecanismo CSMA-CA no Ranurado**

Anteriormente se describió el modo con Beacon habilitado, en el otro tipo de modo en capa MAC IEEE 802.15.4 no se usan Beacons ni la estructura de supertrama para transferencia de datos. Este es el modo sin Beacon habilitado y es una versión simplificada del protocolo MAC en el que se permite incluso una comunicación ad hoc sin el coordinador PAN. Cuando hay un coordinador PAN los dispositivos finales o dispositivos de red deben encuestar a su Coordinador PAN cuando tiene datos pendientes. Todas las transmisiones en el modo sin Beacon habilitado se llevan a cabo con CSMA-CA no ranurado (Lukosius, 2007).

El mecanismo CSMA-CA no ranurado se muestra en la Figura 44. Este algoritmo es muy similar a la versión ranurada, excepto que no utiliza el parámetro *CW*. Después de la inicialización de variables (paso 1), empieza el retardo aleatorio de *backoff* (paso 2) sin alinearse a los límites de *backoff* (no usa sincronización). Después de este retardo, la capa Física realiza el CCA (paso 3). Si el canal está libre (paso 5), se empieza inmediatamente la transmisión de un paquete, en caso contrario (paso 4), el ciclo se repite de manera similar a CSMA-CA ranurado

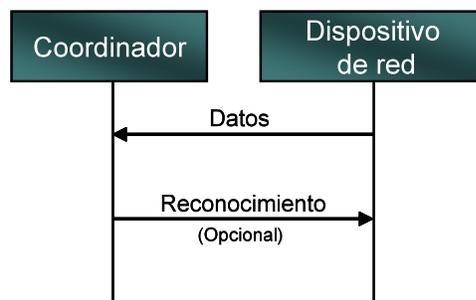


*Figura 44. El algoritmo CSMA-CA no ranurado*

Todas las tramas excepto las tramas ACK deben usar CSMA-CA no ranurado para acceder al canal.

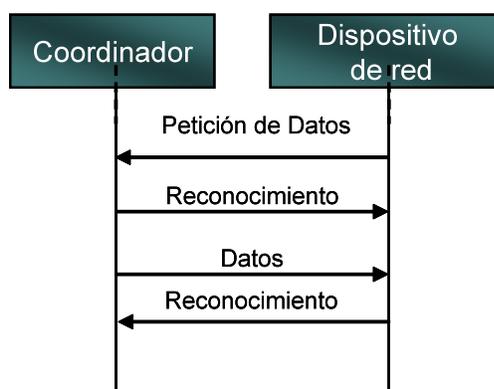
#### A.4.2.1 Modelo de transferencia de datos

En una red estrella sin Beacon habilitado, un dispositivo de red que desea transferir datos, envía una trama de datos al coordinador PAN usando CSMA-CA no ranurado. El coordinador PAN responde entonces, enviando un mensaje de reconocimiento. Como se muestra en la Figura 45.



*Figura 45. Transferencia de datos de un dispositivo de red hacia el Coordinador PAN- modo sin Beacon habilitado, en topología estrella*

Cuando el coordinador requiere transferir datos a un dispositivo en modo sin Beacon habilitado, este almacena los datos hasta que el dispositivo de red envía un mensaje de petición de datos. El coordinador PAN envía un mensaje de reconocimiento al dispositivo indicándole si hay datos pendientes, en ese caso, se enviarán inmediatamente los datos seguidos de un mensaje de reconocimiento. La comunicación se finaliza cuando el dispositivo de red recibe el mensaje de reconocimiento de la trama de datos, Figura 46 muestra el modelo de transferencia de datos de un Coordinador PAN hacia un nodo de red en modo sin Beacon habilitado.



***Figura 46. Transferencia de datos de un coordinador PAN hacia un dispositivo de red- modo sin Beacon habilitado en topología estrella***

Se ha descrito en párrafos anteriores la forma de comunicación en topología estrella en una red que opera en modo sin Beacon habilitado. Este mismo modo de operación (sin sincronización), puede usarse también en redes con topología en malla y árbol. Como dato adicional, la especificación Zigbee ha adquirido el algoritmo de enrutamiento AODV (Ad hoc On Demand Distance) en la capa de red para redes malla y el algoritmo *cluster-tree* de Motorola para redes con topología en árbol (Sinem, 2004).

---

## **Anexo B. El Estándar IEEE.802.15.4**

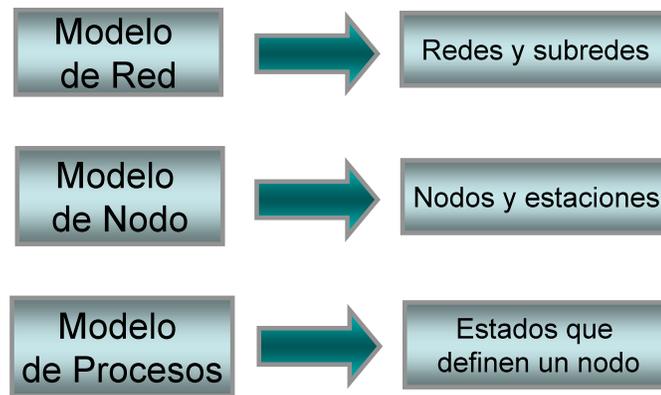
---

### **B.1 El Ambiente De Simulación En OPNET**

La simulación es una manera fácil de probar protocolos o algoritmos, tenemos la posibilidad de cambiar el tamaño de la red, y despliegue de nodos, sin ningún costo y a través de los resultados obtenidos de la simulación se da la posibilidad de evaluar el desempeño del modelo implementado. También nos permite encontrar errores en el diseño, arreglarlos y proponer mejoras. El ambiente de simulación nos permite todas estas características a diferencia de la implementación de modelos reales.

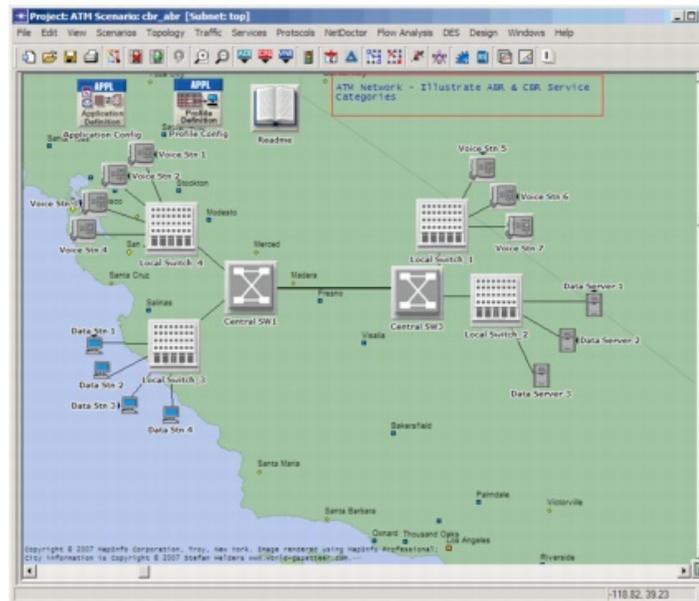
OPNET (OPNET Simulator, 2007) es un simulador que posee una interfaz muy seductora para los usuarios. Esto es debido a que incluye varias librerías de modelos. El código fuente de estas librerías es accesible si se dispone de la versión OPNET Modeler y esto consigue que el programador se pueda familiarizar más rápidamente con toda la jerarquía interna del programa. OPNET es una herramienta de simulación manejada por eventos, que permite la fácil implementación de todos los elementos de un modelo de nodo como elemento de una red. A partir de la definición de la topología de una red y la selección de indicadores estadísticos, el programa simula la dinámica de los flujos de información en un intervalo de tiempo.

Se debe usar la jerarquía mostrada en la Figura 47 para poder plantear las simulaciones. Primero tenemos un modelo de red donde irán definidas las redes y subredes de la simulación, se muestra un ejemplo de modelo de red. Después, disponemos de un modelo de nodos donde se define la estructura interna de los objetos de red (nodos) a través de módulos con una función particular. Por último tenemos el modelo de procesos donde se definen los estados que definen cada módulo que compone un nodo.



**Figura 47. Jerarquía de diseño en OPNET.**

Para un mayor entendimiento del ambiente de simulación en OPNET, profundizaremos en este aspecto. OPNET tiene varios editores, los cuales vamos a explicar de manera general para comprender mejor su funcionamiento.

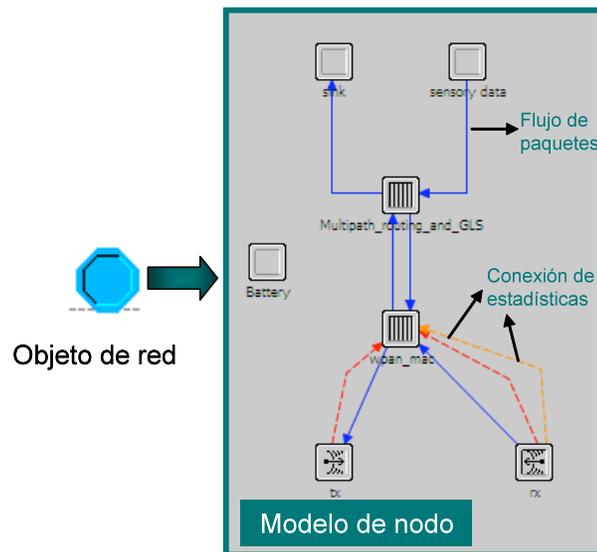


**Figura 48. Modelo de red en el Editor de proyectos**

**Editor de proyecto:** Aquí se pueden elegir estadísticas que deseamos obtener de la red de manera global y de cada nodo en ella, se ejecuta la simulación y pueden verse los resultados. Ésta es el área principal para simular una red, podemos construir modelos de red (tipos de red) usando modelos de la librería estándar proporcionada por OPNET. Puede

crearse además modelos de nodo y procesos, crear formatos de paquetes, a través de editores especiales. La Figura 48 muestra el editor de proyectos en el cual se ha creado un modelo de red.

**Editor de Nodo:** Este editor permite definir el comportamiento de cada objeto de red. El comportamiento de un nodo se define usando diferentes módulos (procesadores, colas, transmisores o receptores inalámbricos, etc.), cada uno de éstos tiene un comportamiento interno de acuerdo al modelo de procesos atribuido, ese comportamiento o tarea puede ser creación de datos, almacenamiento, etc. Los módulos se conectan a través de flujos de paquetes o conexiones de estadísticas. De tal manera que un objeto de red definido por su modelo de nodo está compuesto de varios módulos como se ejemplifica en la Figura 49.



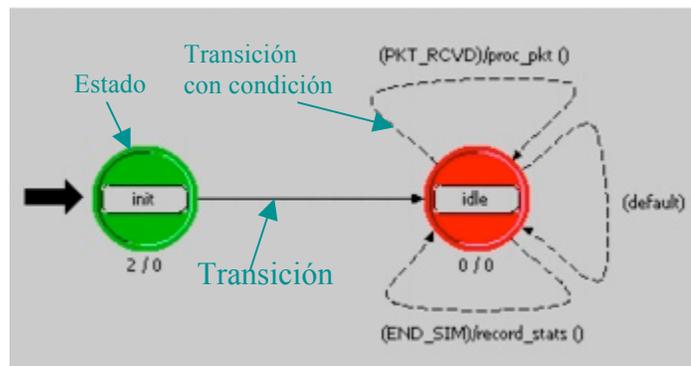
**Figura 49. Modelo de nodo en OPNET**

En la Tabla IV se muestran los objetos disponibles en el editor de nodos para crear un objeto de red que describirá el comportamiento de un nodo.

**Tabla IV. Módulos del editor de nodo.**

<b>Presentación del objeto</b>	<b>Nombre y función del objeto.</b>
	Icono estándar para un módulo de procesado. Su función principal es construir bloques de modelo de nodo.
	Icono estándar usado para un módulo de cola. Lo que le hace diferente del resto de módulos es que el módulo de colas tiene recursos adicionales internos llamados subcolas
	Icono usado para un módulo de transmitir. Transmisor Punto a Punto
	Icono usado para un módulo de recibir. Receptor Punto a Punto.
	Icono usado para un módulo de transmitir. Transmisor tipo bus.
	Icono usado para un módulo de recibir. Receptor tipo bus.
	Icono usado para un módulo de transmitir. Transmisor por radiofrecuencia
	Icono usado para un módulo de recibir. Transmisor por radiofrecuencia
	Icono estándar usado para las comunicaciones vía satélite.
	Flujo de paquetes: Son conexiones que llevan los paquetes desde un módulo fuente a un módulo destino.
	Conexión de estadísticas: Transportan datos de un módulo fuente a un módulo destino. Sirven como interfase para que un módulo fuente pueda compartir datos con un módulo destino, y proporcionar información respecto de su estado.
	Asociación lógica: Su misión es indicar qué relación existe entre dos módulos de la simulación. Por tanto, no transportan datos entre módulos.
	Icono estándar para un módulo esys.

**Editor de modelo de procesos:** permite crear modelos de procesos, los cuales controlan el comportamiento de los módulos que componen un modelo de nodo creado en el editor de modelo de nodo. Los modelos de procesos están representados por maquinas de estado finitas (FSM: Finite State Machines, por sus siglas en ingles), y se crean con iconos que representan estados y líneas que representan transiciones entre estados, ver Figura 50. La operación que realiza cada estado o cada transición se describe con bloques de código C o C++. Este código además de las funciones específicas de OPNET se llama Proto C. Las funciones de OPNET se llaman *Kernels*. Estos *Kernels* representan funciones, dentro de los más importantes podemos mencionar; los referentes a generación y manejo de paquetes, recolección de estadísticas, procesamiento y calendarización de interrupciones, interfase de información de control (ICI), acceso a atributos, entre otros.



**Figura 50. Ejemplo de un modelo de Procesos**

En este editor, se pueden crear estados y transiciones, declarar variables, crear macros, etc. Hay tres lugares principales en los cuales podemos usar proto C:

- *Enter Executive*: código que se ejecuta cuando el módulo entra a un estado. El Enter Executive es la parte alta de un estado.
- *Exit Executive*: código que se ejecuta cuando el módulo deja un estado. Y es la parte baja de un estado
- *Transition Executive*: código que se ejecuta en respuesta a un evento específico.

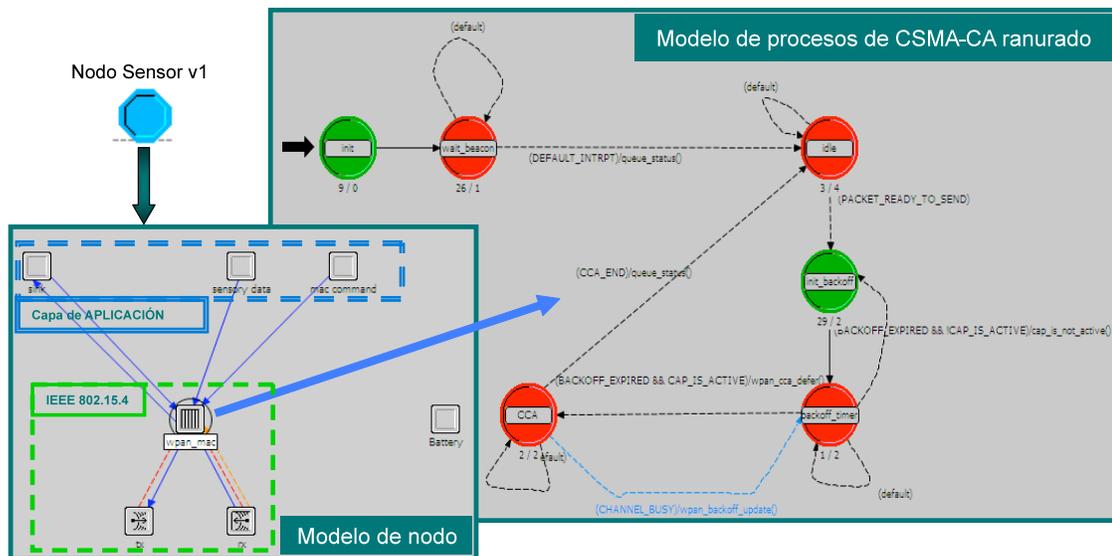
**Editor de Formato de paquetes:** Este editor permite definir la estructura interna de un paquete como un conjunto de campos. El formato de paquete puede contener uno o más campos que se representan como rectángulos de colores. El tamaño de los rectángulos es proporcional al número de bits especificados en el *size* del campo. Cuando se usan formatos de paquetes en algún módulo procesador por ejemplo; se debe especificar en el objeto transmisor y receptor que forman el modelo de nodo que deben ser capaces de transmitir o recibir ese formato de paquete, respectivamente.

## **B.2 Modelos Previos De Simulación En OPNET**

Debido a que el diseño del estándar IEEE 802.15.4 permite la implementación de radio transceptores con consumo de potencia extremadamente bajo comparado con actuales tecnologías inalámbricas y ya que se caracteriza por enfocarse en redes inalámbricas de sensores, se tomó como objetivo inicial de este trabajo de tesis, implementar nuestra propuesta de agrupamiento para redes WSN bajo un modelo de simulación con las características en las capas física y MAC de acuerdo al estándar IEEE 802.15.4. La versión actual en OPNET trae en sus librerías un modelo de nodo llamado Zigbee (de acuerdo a la especificación IEEE 802.15.4/Zigbee) que tiene capa física y MAC IEEE 802.15.4 y capa de red y aplicación de acuerdo a la especificación Zigbee, sin embargo no se pudo usar este modelo ya que las dos capas superiores no proporcionan el código fuente (a menos que se cuente con una membresía Zigbee) y es muy complejo el tratar de usar ese modelo sin saber como realizar la comunicación entre capas.

### **B.2.1 Modelo De Simulación IEEE 802.15.4: Capas Física Y MAC**

Debido a la imposibilidad de utilizar el modelo de nodo Zigbee, se obtuvieron dos modelos de simulación de open-ZB que es un sitio web que ayuda en la difusión de implementaciones en código abierto de protocolos IEEE 802.15.4/Zigbee (Open-ZB, 2007). Estos modelos de simulación implementan la capa Física y MAC IEEE 802.15.4 en OPNET. En la Figura 51 y Figura 52 se muestra el modelo de nodos del Nodo Sensor v1 y Nodo Sensor v2 respectivamente, implementado en OPNET con capa MAC operando en modo con Beacon habilitado.



**Figura 51. Modelo de nodo y modelo de procesos de capa MAC del Nodo Sensor v1.**

Las características de estos modelos son:

La **capa física** consiste de un radio transmisor **tx** y un receptor **rx** con la especificación IEEE 802.15.4, con frecuencia de operación en la banda 2.4 GHz y tasa de datos de 250 kbps, potencia de transmisión de 1 mW y técnica de modulación QPSK

La **capa MAC** implementa el mecanismo CSMA-CA (Carrier Sense Multiple Access-Collision Avoidance) y el mecanismo GTS (Guaranteed Time Slot, por sus siglas en inglés). El tráfico de datos GTS (solo en versión 2) que generan los nodos con tráfico con tiempo crítico, que proviene de la capa de aplicación en el módulo *GTS Traffic Source*, se almacena en un buffer con una capacidad específica y se envía a la red cuando el GTS correspondiente está activo. Mientras que las tramas de datos no críticas en tiempo, que son generadas en el módulo *Sensory Data* (versión 1) o *Traffic Source* (versión 2) se almacenan en un buffer sin límite y basado en el algoritmo CSMA-CA ranurado y transmitidos a la red durante el CAP. Esta capa también es responsable de la generación de tramas Beacon y sincronización de la red cuando el nodo es un Coordinador PAN.

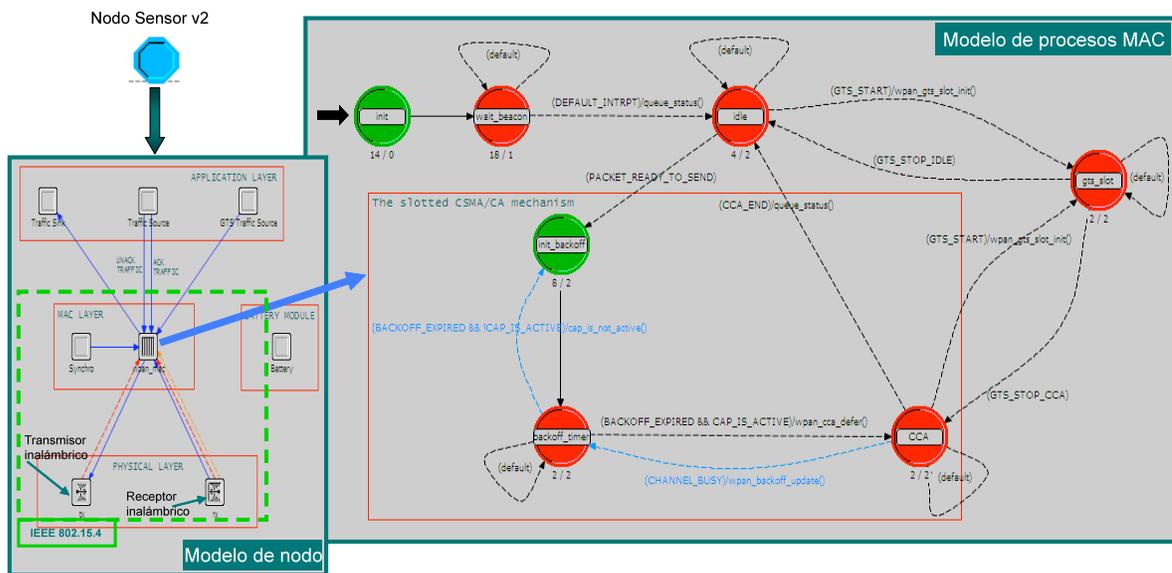
La **capa de Aplicación** consiste de dos generadores de tráfico de datos: *Traffic Source* y *GTS Traffic Source* y un módulo *Sink*. La fuente *Traffic Source* genera tramas de datos con y sin reconocimiento. El módulo *GTS Traffic Source* puede producir tramas de datos con o

sin reconocimiento usando el mecanismo GTS en la capa MAC (versión 2). En la versión 1 el módulo *Sensory Data* genera datos sin reconocimiento. El módulo *Sink* recibe tramas que han enviado las capas inferiores y realiza estadísticas.

El *módulo Battery* calcula la energía consumida y residual en los nodos de acuerdo a los valores manejados en gasto de corriente, los cuales están especificados para dispositivos MICAZ de la compañía Crossbow. La Tabla V muestra algunas de las especificaciones de este dispositivo.

**Tabla V. Especificaciones del dispositivo MICAZ**

Transceptor RF		
Banda de Frecuencia	2400 MHz a 2483.5 MHz	Banda ISM
Tasa de transmisión (TX) de datos	250 kbps	
Potencia RF	-24 dBm a 0 dBm	
Drenado de corriente	19.7 mA	En modo de Recepción
	11 mA	TX, -10 dBm
	14 mA	TX, -5 dBm
	17.4 mA	TX, -0 dBm
	20 $\mu$ A	Modo <i>Idle</i>
	1 $\mu$ A	Modo de ahorro de energía

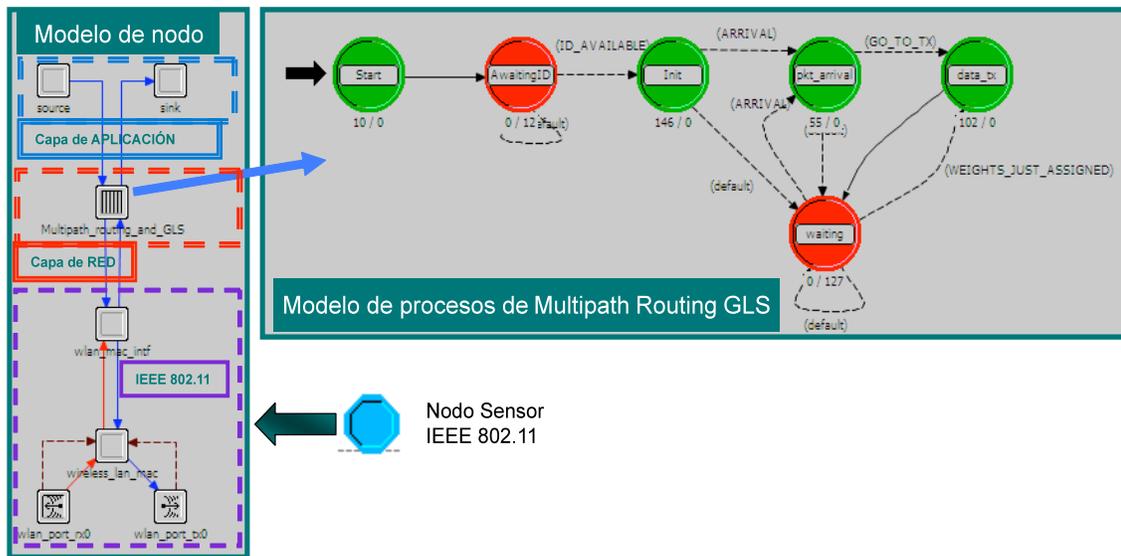


**Figura 52. Modelo de nodo y modelo de procesos de capa MAC del Nodo Sensor v2.**

El modelo de simulación del Nodo Sensor v2, ofrece calidad de servicio (QoS) a través del mecanismo GTS. El dispositivo hace una petición hacia el Coordinador PAN del número de ranuras de tiempo garantizadas (GTS) que solicita, si hay disponibles esas GTS en la estructura de la supertrama, el Coordinador PAN le informará al dispositivo cuales son las ranuras de tiempo que le ha asignado y las usará para transmitir sus datos sin contender por el canal con otros dispositivos.

### **B.2.2 Modelo De Simulación IEEE 802.11: Capa De Red.**

Se estudió un algoritmo de enrutamiento realizado en (Gallardo Lopez, et al., 2007) aplicado a redes WSN. Dicho algoritmo, se desarrolló sobre capas inferiores IEEE 802.11, en un ambiente de simulación OPNET. El algoritmo usado en capa de red permite el enrutamiento a través de trayectorias múltiples entre cada nodo sensor y el sumidero, cada ruta tiene asignado un peso que se da de acuerdo a la energía de la trayectoria, de tal forma que cuando las rutas principales se saturan o se desgastan, pueden usarse las rutas alternas. El modelo de nodo del Nodo Sensor IEEE 802.11 con capa de red implementando el algoritmo de enrutamiento por trayectorias múltiples se muestra en la Figura 53.



**Figura 53. Modelo de nodo y modelo de procesos de capa de red del Nodo Sensor IEEE 802.11 con algoritmo de enrutamiento por trayectorias múltiples.**

En este algoritmo los mensajes de datos que genera un nodo A y que van dirigidos al nodo B que formar parte de la ruta hacia el sumidero, serán almacenados en el mismo buffer en el que se guardan los mensajes de datos generados por la capa de aplicación del nodo B. Después el nodo B aplicara el algoritmo GLS (Generalized Load Sharing) para transmitir sus datos y el de otros nodos hacia el siguiente salto. El paquete de datos que retransmite un cierto nodo no tiene una trayectoria fija por la que tendrá que viajar hacia el sumidero, sino que ahora en cada nodo sensor se decidirá la trayectoria para ese paquete de datos, lo que ocasionará que se distribuya la carga de manera más homogénea entre los nodos cercanos al sumidero.