

TESIS DEFENDIDA POR
JUAN MIGUEL HERNÁNDEZ ONTIVEROS

Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ

Dr. José Rosario Gallardo López
Director del Comité

Dr. Jaime Sánchez García
Miembro del Comité

Dr. Luis Armando Villaseñor
González
Miembro del Comité

Dr. Pedro Negrete Regagnon
Miembro del Comité

Dr. Arturo Velázquez Ventura
*Coordinador del programa de
posgrado en Electrónica y
Telecomunicaciones*

Dr. Edgar Gerardo Pavía López
Director de Estudios de Posgrado

9 de febrero de 2007

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



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

**PROTOCOLO DE CONTROL DE ACCESO AL MEDIO (MAC) BASADO EN CSMA/CA
QUE TOMA EN CUENTA REQUERIMIENTOS DE CALIDAD DE SERVICIO Y QUE ES
EFICIENTE EN EL CONSUMO DE ENERGÍA, APLICABLE A REDES DE SENSORES.**

TESIS

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

Presenta:

JUAN MIGUEL HERNÁNDEZ ONTIVEROS

Ensenada, Baja California, México, 9 de febrero de 2007.

RESUMEN de la Tesis que presenta **Juan Miguel Hernández Ontiveros**, como requisito parcial para la obtención del grado de **MAESTRO en CIENCIAS en ELECTRÓNICA y TELECOMUNICACIONES con orientación en TELECOMUNICACIONES**. Ensenada, Baja California, México. 9 de febrero de 2007.

PROTOCOLO DE CONTROL DE ACCESO AL MEDIO (MAC) BASADO EN CSMA/CA QUE TOMA EN CUENTA REQUERIMIENTOS DE CALIDAD DE SERVICIO Y QUE ES EFICIENTE EN EL CONSUMO DE ENERGÍA, APLICABLE A REDES DE SENSORES.

Resumen aprobado por:

Dr. José Rosario Gallardo López

Director de tesis

Una red inalámbrica de sensores (WSN) es una red de área local auto-configurable cuyos nodos, equipados con algún tipo de sensor, envían sus mediciones a un conjunto de nodos receptores llamados sumideros. Uno de los aspectos más críticos de estas redes es el manejo efectivo de la energía, lo que hace que los protocolos de comunicación utilizados sean muy importantes para evitar desperdicios de energía en colisiones o en escucha inútil del canal. Dado que las tasas de transmisión de las WSN son cada vez más altas, tiene sentido pensar en el sensado de información de tiempo real. Estas aplicaciones necesitan que el sistema sea capaz de ofrecer garantías de calidad de servicio (QoS).

Este trabajo de tesis es parte de un proyecto más amplio, que se desarrolla en paralelo en 3 tesis de maestría. El protocolo de acceso al medio abordado consiste de una etapa de *configuración* previa a la de *transmisión* de la información medida por los sensores. La etapa de *configuración*, a su vez, consiste de un período de descubrimiento y reservación de una ruta entre cada nodo sensor y el sumidero, que satisfaga los criterios de QoS; posteriormente hay un proceso de cálculo de ventanas de actividad para los diferentes grupos de nodos que se comunican directamente (a un salto). Por otro lado, en la etapa de *transmisión*, los nodos de un mismo grupo se coordinan para despertar simultáneamente dentro de su respectiva ventana de actividad y transmitir información rumbo al sumidero.

Este trabajo se enfoca al problema de encontrar un protocolo de acceso al medio para que los nodos de un mismo grupo puedan comunicarse eficientemente dentro de la ventana de actividad que les corresponde. De esta manera, los nodos ahorran energía mediante el apagado de su subsistema de comunicaciones durante el tiempo en que no tienen que intercambiar información. El mecanismo propuesto está basado en el protocolo PCF (función de coordinación puntual) descrito en el estándar de redes inalámbricas IEEE 802.11. Se toman en cuenta también los requerimientos de QoS en el sentido de que la frecuencia con que se presentan las ventanas de actividad coordinada y el tamaño de las mismas son suficientes para la transmisión oportuna del tráfico que se está generando. La definición de estos parámetros se hace en colaboración con el protocolo de enrutamiento.

Palabras clave: Redes inalámbricas de sensores (WSN), protocolos de control de acceso al medio (MAC), calidad de servicio (QoS), uso eficiente de energía.

ABSTRACT of the thesis of **Juan Miguel Hernández Ontiveros**, presented as a partial requirement to obtain the **MASTER OF SCIENCE degree in ELECTRONICS AND TELECOMUNICATIONS with specialization in TELECOMUNICATIONS**. Ensenada, Baja California, Mexico. February of 2007.

MEDIUM ACCESS CONTROL PROTOCOL (MAC) BASED ON CSMA/CA THAT TAKES INTO ACCOUNT QUALITY OF SERVICE REQUIREMENTS AND ENERGY EFFICIENCY, APPLICABLE TO WIRELESS SENSOR NETWORKS.

A wireless sensor network (WSN) is a self-configurable wireless local-area network (WLAN) through which terminals, equipped with some type of sensor, transmit the measured parameters to a predetermined set of information receptacles, known as sinks. A key aspect of WSNs is energy efficiency, which turns the communication protocols into very important pieces of the node architecture in order to avoid energy wastage in collisions and idle listening. Since the transmission rates of WSNs are growing, it makes sense to foresee their application, in the near future, to sense real-time information. Such applications will need for the system to be able to provide quality of service (QoS) guarantees.

This work is part of a broader project, which is being developed within 3 M.Sc. theses. The medium access control protocol that we tackle in this work consists of a *configuration* phase prior to the *transmission* of the information gathered by the sensors. The *configuration* phase, in turn, includes a period of discovery and reservation of a route, between each sensing node and the sink, that satisfies the QoS criteria; next, there is a process to calculate and allocate activity windows to the different clusters of nodes that communicate directly (one hop apart). In the *transmission* stage, on the other hand, those nodes corresponding to a given cluster coordinate to wake up simultaneously, within their respective activity window, to transmit information and move it one hop closer to the sink.

This thesis work focuses on the problem of finding a suitable medium access control protocol, so that the nodes of a given cluster can communicate efficiently within their respective activity window. This way, the nodes save energy by turning off their transceiver during the time that they do not have to exchange information. The proposed mechanism is based on the PCF (Point Coordination Function) protocol described in the IEEE 802.11 standard for wireless networks. The QoS requirements are taken into account in the sense that the frequency and duration of the activity windows are enough for the timely transmission of the traffic that is being generated by all the nodes in the cluster. The definition of the QoS parameters is done in collaboration with the routing protocol.

Keywords: Wireless sensor networks (WSN), medium access control (MAC) protocols, quality of service (QoS), energy efficiency.

DEDICATORIA

A mi *Mamá Silvia* pues sin ti no sería lo que soy. Me acuerdo cuando me enseñaste a leer, escribir, sumar y todas esas cosas que uno aprende en el seno del hogar, nunca lo olvidaré pues me tenías mucha paciencia y siempre buscabas el mejor camino para que yo le entendiera más fácilmente. Si volviera a nacer y me dieran la opción de decidir a donde quiero ir escogería volver a tenerte a ti otra vez como mamá. Eres y serás siempre mi ejemplo a seguir.

A mi *papá Miguel Angel* y no menos importante que mi mamá pues inculcaste en mí todos los valores que se necesitan para salir adelante en la vida y nunca rendirte ante nadie ni ante nada. Me acuerdo que siempre me dejabas decidir cuando cruzar la calle y cuando no, sin estarme agarrando de la mano, pues tendría que tomar decisiones importantes durante toda mi vida y esta era tu forma de enseñarme desde chiquito que uno es quien forja su camino a base de retos y pruebas superadas. Al igual que mi mamá ustedes son los dos pilares más fuertes que tengo para vivir y para seguir adelante.

A mi *hermano David Alfredo*, por enseñarme todo lo que sabe y cuidarme desde siempre como si fuera su hijo en vez de su hermano menor. Nunca me dejaste abajo y hasta la fecha me sigues escuchando y aconsejando. Sabes que te quiero y siempre estaré agradecido por ser tan buen hermano.

A mi *hermana Yuridia Azucena*, por ser la mejor hermana que tengo y por compartir su carro conmigo. Definitivamente no pude tener una mejor hermana pues eres igual a mi hermano David y a mí.

A mis preciosas sobrinas *Jazmín Aurora* y *Livier Carolina* por llegar a mi vida en el momento en que más las necesitaba.

A todos mis *tíos y tías, primos y primas, sobrinos y sobrinas*, de Culiacán y de Veracruz.

Mi familia, lo más importante en el mundo.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. José Rosario Gallardo López, quien se ganó mi admiración y respeto por su gran calidad humana, por no desesperarse conmigo y tenerme paciencia, por esmerarse tanto a la hora de impartir sus cátedras y por haber sido más que un director de tesis un amigo en quien pude confiar y apoyarme en momentos en que me sentía perdido.

Al Dr. Jaime Sánchez García, por sus comentarios y sugerencias durante el desarrollo de la tesis, y por las pláticas tan amenas que tuve en su cubículo en las cuales me orienta sobre como y que hacer para seguir con mi carrera profesional.

Al Dr. Luis Armando Villaseñor González, por la ayuda que me brindo durante el desarrollo de mi tesis, y por todas sus observaciones y sugerencias que realmente tomé en cuenta y me sirvieron para realizar esta tesis.

Al Dr. Pedro Negrete Regagnon, por sus consejos y sugerencias durante la realización de esta tesis y durante los cursos del posgrado.

A Angel Savín, Juan Angel Estrada, Rodolfo Camacho y Carlos Gómez por brindarme su amistad desinteresada. Se que los amigos que uno tiene en toda su vida solo los puedes contar con los dedos de una mano y se que ustedes son realmente mis amigos.

A Marcial Castro y Russel Patrón les agradezco su apoyo en los cursos y su paciencia para explicarme los programas, nunca lo olvidaré.

A Paul Medina, por su ayuda al final de la maestría.

A mis demás compañeros Reynaldo, Russel, Víctor, Joel, Magali, Rubén, Fabián, Elizabeth, Carlos Rocha, José Edgar, Leo, Martín, Cuadras, Alberto, Carlos Morales y Araceli, por ser la mejor generación de CICESE.

A las secretarias del DET, Aurora, Rossy y Laura, por su ayuda en los trámites administrativos.

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada *CICESE*, por permitirme continuar preparándome.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología *CONACYT*, por la beca que me dio durante 2 años.

CONTENIDO

| | Página |
|--|-------------|
| CONTENIDO | i |
| ÍNDICE DE FIGURAS | v |
| ÍNDICE DE TABLAS | vii |
| Nomenclatura | viii |
| I. Introducción | 1 |
| I.1. Antecedentes | 1 |
| I.1.1. Operación del proyecto global | 4 |
| I.1.2. Descripción del proyecto global | 6 |
| I.1.2.1. Descubrimiento de topología | 6 |
| I.1.2.2. Reservación de ruta | 7 |
| I.1.2.3. Identificación de los agrupamientos que interfieren | 9 |
| I.1.2.4. Notificación al sink de agrupamientos interferentes | 9 |
| I.1.2.5. Asignación de ventanas de actividad | 10 |
| I.1.2.6. Fase de operación normal | 10 |
| I.1.2.7. Reconfiguración | 11 |
| I.2. Planteamiento del problema | 12 |
| I.3. Objetivos | 13 |
| I.4. Infraestructura | 14 |
| I.5. Trabajos previos | 14 |
| I.6. Organización de la tesis | 17 |
| II. Redes locales inalámbricas 802.11 | 20 |
| II.1. Introducción | 20 |
| II.2. Arquitectura de IEEE 802.11 | 22 |
| II.3. Servicios de IEEE 802.11 | 27 |
| II.4. La pila de protocolos de 802.11 | 33 |
| II.5. La capa física de 802.11 | 35 |
| II.6. El protocolo de la subcapa MAC de 802.11 | 38 |

CONTENIDO (CONTINUACIÓN)

| | Página |
|---|-----------|
| II.6.1. Protocolo de intercambio de trama MAC | 40 |
| II.6.2. El problema del nodo oculto | 41 |
| II.6.3. Formato general de la trama 802.11 | 44 |
| II.6.3.1. Tramas de control | 45 |
| II.6.3.2. Tramas de datos | 47 |
| II.6.3.3. Tramas de gestión | 48 |
| II.6.4. Trama de aviso (Beacon) | 48 |
| II.6.5. Espacios Intertramas (IF) | 50 |
| II.7. Mecanismos de acceso | 52 |
| II.7.1. Función de coordinación distribuida (DCF) | 52 |
| II.7.2. Función de coordinación puntual (PCF) | 56 |
| III. Redes locales inalámbricas 802.15.4..... | 59 |
| III.1. Introducción | 59 |
| III.2. Características únicas de las redes inalámbricas de sensores | 62 |
| III.3. ¿Por qué es importante el diseño de la capa mac? | 63 |
| III.4. Esquemas MAC más utilizados | 64 |
| III.5. Necesidad de la eficiencia del recurso | 64 |
| III.6. Calidad de servicio considerando eficiencia de energía | 66 |
| III.7. Consumo de energía en las redes de sensores..... | 67 |
| III.8. Protocolos MAC eficientes en energía | 68 |
| III.9. Clasificación y comparación del protocolo MAC | 70 |
| III.9.1. Protocolo MAC centralizado | 71 |
| III.9.2. Protocolo MAC distribuido | 72 |
| III.9.3. Protocolo MAC híbrido | 73 |
| III.10. Estándar para redes inalámbricas del tipo 802.15.4..... | 74 |
| III.10.1. Capa de red | 74 |
| III.10.2. Capa de enlace de datos | 76 |

CONTENIDO (CONTINUACIÓN)

| | Página |
|---|------------|
| III.10.2.1. Estructura de las tramas MAC | 78 |
| III.10.2.2. Otras características del MAC | 85 |
| III.10.2.3. Transferencia de datos al coordinador | 87 |
| III.10.2.4. Transferencia de datos desde el coordinador | 87 |
| III.10.2.5. Seguridad en IEEE 802.15.4..... | 88 |
| III.10.3. Capa física de IEEE 802.15.4 | 88 |
| III.10.3.1. Canales IEEE 802.15.4 | 90 |
| III.10.3.2. Modulación | 91 |
| III.10.3.3. Sensibilidad y potencia | 93 |
| III.10.3.4. Interferencia de y para otros dispositivos | 93 |
| IV. Propuesta de la tesis..... | 95 |
| IV.1. Introducción | 95 |
| IV.2. Funcionamiento de la PCF en OPNET | 98 |
| IV.3. Modelo PCF + Dormir propuesto | 103 |
| V. Simulación y resultados..... | 112 |
| V.1. Introducción | 112 |
| V.1.1. Descripción de la estructura jerárquica de OPNET | 113 |
| V.1.2. Modelo IEEE 802.11 ORIGINAL | 117 |
| V.1.2.1. Modelo de red | 118 |
| V.1.2.2. Modelo de nodos..... | 119 |
| V.1.2.3. Modelo de procesos | 119 |
| V.2. Parámetros de simulación | 121 |
| V.3. Resultados de las simulaciones..... | 124 |
| V.3.1. Simulación del tiempo dormido..... | 124 |
| V.3.2. Simulación del consumo de energía | 128 |
| V.3.3. Simulación del retardo promedio..... | 131 |
| VI. Conclusiones | 133 |

CONTENIDO (CONTINUACIÓN)

| | Página |
|----------------------------|------------|
| VI.1. Conclusiones..... | 133 |
| VI.2. Trabajo futuro | 135 |
| Referencias | 136 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | Página |
|---|--------|
| Figura 1 BSS independiente. | 24 |
| Figura 2 BSS de Infraestructura..... | 25 |
| Figura 3 Conjunto de servicio extendido..... | 26 |
| Figura 4 Sistema de distribución. | 27 |
| Figura 5 Parte de la pila de protocolos del 802.11..... | 34 |
| Figura 6 Funciones de coordinación de la MAC..... | 39 |
| Figura 7 Problema del nodo oculto, los nodos 1 y 3 son ocultos. | 41 |
| Figura 8 RTS/CTS. | 43 |
| Figura 9 Formato de la trama MAC en IEEE 802.11. | 44 |
| Figura 10 Formato de la trama Beacon..... | 49 |
| Figura 11 Espaciado entre tramas 802.11..... | 50 |
| Figura 12 Uso del NAV para el sensado virtual..... | 55 |
| Figura 13 Periodo libre de contienda y periodo de contienda. | 56 |
| Figura 14 Utilizando el PCF..... | 57 |
| Figura 15 Arquitectura de las redes de sensores..... | 63 |
| Figura 16 Clasificación de los protocolos inalámbricos MAC..... | 71 |
| Figura 17 Ejemplos de topología, red tipo estrella y par a par..... | 75 |
| Figura 18 Relación de IEEE 802.15.4 con el sistema OSI..... | 77 |
| Figura 19 Formato general de la trama MAC..... | 79 |
| Figura 20 Vista esquemática de la trama de enterado (ACK)..... | 82 |
| Figura 21 Vista esquemática de la estructura de la trama de comandos MAC..... | 83 |
| Figura 22 Vista esquemática de la trama Beacon..... | 84 |
| Figura 23 Estructura de las supertramas..... | 84 |
| Figura 24 Estructura de los canales de la IEEE 802.15.4..... | 91 |
| Figura 25 Envío de beacon a las estaciones en la BSS..... | 100 |
| Figura 26 Estructura de la supertrama..... | 106 |
| Figura 27 Estructura de la supertrama..... | 108 |

ÍNDICE DE FIGURAS (CONTINUACIÓN)

| | Página |
|--|--------|
| Figura 28 Jerarquía de diseño en OPNET. | 114 |
| Figura 29 Dominio de red de nuestra propuesta. | 118 |
| Figura 30 Dominio de nodos del modelo utilizado..... | 119 |
| Figura 31 Modelo de la subcapa MAC con el estado “sleep” agregado..... | 120 |
| Figura 32 Gráfica del tiempo dormido del agrupamiento..... | 126 |
| Figura 33 Gráfica del tiempo dormido del nodo PC..... | 127 |
| Figura 34 Gráfica del consumo de energía del agrupamiento. | 129 |
| Figura 35 Gráfica del consumo de energía del nodo 2. | 131 |
| Figura 36 Gráfica del retardo promedio del agrupamiento..... | 132 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | Página |
|---|--------|
| Tabla I Servicio de IEEE 802.11 | 28 |
| Tabla II Propiedades de IEEE 802.15.4..... | 75 |
| Tabla III Frecuencia de canales IEEE 802.15.4..... | 91 |
| Tabla IV Parámetros de modulación | 92 |
| Tabla V Valores para el cálculo de la corriente consumida. | 109 |
| Tabla VI Lista de funciones del programa original | 121 |
| Tabla VII Parámetros de simulación de la WLAN..... | 123 |
| Tabla VIII Tiempo dormido por nodo del agrupamiento. | 125 |
| Tabla IX Tiempo dormido por nodo del agrupamiento | 126 |
| Tabla X Consumo de energía por nodo del agrupamiento. | 128 |
| Tabla XI Consumo de energía por nodo del agrupamiento..... | 130 |

NOMENCLATURA

| | |
|-----------|---|
| 802.11 | Estándar IEEE para redes locales inalámbricas. |
| 802.15.1 | Estándar IEEE para bluetooth. |
| 802.15.4 | Estándar IEEE para redes de sensores. |
| ACK | Reconocimiento de entrega de tramas. |
| AES | Estándar de encriptación avanzada. |
| ASCII | Código estadounidense estándar para el intercambio de información. |
| Backbone | Red dorsal. Medio del sistema de distribución. |
| Beacon | Control de guías. |
| Bluetooth | Estándar para redes inalámbricas de área personal IEEE 802.15.1 |
| BPSK | Transmisión por desplazamiento de fase binaria. |
| BSS | Servicio básico fijo. |
| CCK | Modulación por código complementario. |
| CDMA | Acceso múltiple por división de código. |
| CFP | Periodo libre de contienda. |
| CICESE | Centro de investigación científica y de educación superior de Ensenada. |
| CP | Periodo de contienda. |
| CRC | Comprobación de redundancia cíclica. Trama de chequeo de 16 bits. |
| CSMA | Acceso múltiple por sentido de portadora. |
| CSMA/CA | Acceso múltiple por sentido de portadora con evasión de colisiones. |
| CSMA/CD | Acceso múltiple por sentido de portadora con detección de colisiones. |

NOMENCLATURA (CONTINUACIÓN)

| | |
|-------------|---|
| CTS | Listo para enviar. |
| DA | Dirección destino. |
| DBPSK | Modulación binaria por cambio de fase diferencial. |
| DCF | Función de coordinación distribuida. |
| DIFS | Tiempo de inactividad mínimo del medio para el servicio de DCF. |
| DLL | Capa de enlace de datos. |
| DQPSK | Modulación cuaternaria por cambio de fase diferencial. |
| DS | Sistema de distribución. |
| DSSS | Espectro ensanchado por secuencia directa. |
| ESA | Área de servicio extendido. |
| ESS | Servicio fijo extendido. |
| FDMA | Acceso múltiple por división de frecuencia. |
| FFD | Función completa del dispositivo. |
| FHSS | Espectro ensanchado por salto de frecuencia. |
| FSK | Modulación por desplazamiento de frecuencia. |
| Full duplex | Comunicación de datos bidireccional y simultánea. |
| GFSK | Modulación por desplazamiento de frecuencia gaussiana. |
| GTS | Ranuras de tiempo garantizadas. |
| HRDSSS | Tasa alta de espectro ensanchado por secuencia directa. |
| IBSS | Servicio básico fijo independiente. |

NOMENCLATURA (CONTINUACIÓN)

| | |
|---------|---|
| IEEE | Instituto de ingenieros eléctricos y electrónicos. |
| IR | Infrarrojo. |
| ISM | Banda industrial, médica y científica. |
| ISO | Organización internacional para la estandarización. |
| LAN | Red de área local. |
| LLC | Control de enlace lógico. |
| LR-WPAN | Red de área personal inalámbrica de bajo rango. |
| MAC | Control de acceso al medio. |
| MFR | Chequeo de la trama. |
| MKS | Transmisión de desplazamiento mínimo del FSK. |
| MPDU | Trama de la unidad de datos del protocolo MAC. |
| MSDU | Unidad de servicios de datos MAC. |
| OFDM | Multiplexación por división de frecuencia ortogonal. |
| OPNET | Simulador de redes. |
| OSI | Interconexión de sistemas abiertos. |
| PAMAS | Protocolo basado en contienda diseñado para redes ad hoc. |
| PAN | Red de área personal. |
| PC | Coordinador puntual. |
| PCF | Función de coordinación puntual. |
| PDU | Unidad de datos de protocolo. |

NOMENCLATURA (CONTINUACIÓN)

| | |
|-----------|--|
| PHR | Longitud del paquete. |
| PIFS | Tiempo usado por la PCF para que el PC gane el control del medio e inicie el periodo libre de contienda. |
| PN | Seudo ruido. |
| PPDU | Capa física de la unidad de datos del protocolo MAC. |
| PPM | Modulación por posición de pulso. |
| PSDU | Capa física de la unidad de servicios de datos. |
| QAM | Modulación de amplitud en cuadratura. |
| QoS | Calidad de servicio. |
| QPSK | Modulación cuaternaria por cambio de fase. |
| RFD | Función reducida del dispositivo. |
| RTS | Petición para enviar. |
| SA | Dirección fuente. |
| SAPs | Puntos de acceso a servicios. |
| SHR | Encabezado de sincronización. |
| SIFS | Tiempo de transmisiones indivisibles como RTS-CTS-Datos-ACK. |
| SINK | Sumidero de información. |
| SMAC | Protocolo MAC basado en contienda. |
| SmartNode | Algoritmo basado en contienda. |
| SSCS | Subcapa de convergencia de servicios específicos. |

NOMENCLATURA (CONTINUACIÓN)

| | |
|--------|---|
| TDMA | Acceso múltiple por división de tiempo. |
| WLAN | Red de área local inalámbrica. |
| WPAN | Red de área personal inalámbrica. |
| ZigBee | Protocolo de comunicaciones inalámbricas basado en el estándar 802.15.1 |

I. INTRODUCCIÓN

En la vida hay algo peor que el fracaso: el no haber intentado nada.

--Franklin D. Roosevelt

I.1. Antecedentes

Una red inalámbrica de sensores (WSN) es una red de área local inalámbrica auto-configurable (WLAN) a través de la cual las terminales equipadas con un tipo de sensor, transmiten los parámetros medidos a un conjunto predeterminado de receptores de información. Las principales diferencias entre una WLAN tradicional [802.11, 1999] y una WSN [802.15.4, 2003] son que, en general, las últimas necesitan ser muy eficientes con la energía ya que sus nodos son alimentados con baterías no recargables, y su topología varía

porque los nodos individuales pueden ser apagados para ahorrar energía o si las baterías se terminan.

La arquitectura típica de una WSN es un conjunto grande de nodos sensores y uno o más nodos que colocan y procesan la información medida por los nodos sensores. A estos nodos especiales, que pueden tener características distintas a los demás nodos en cuanto a duración de la batería, capacidad de procesamiento, capacidad de comunicación, etc., se les conoce como sumideros o sinks.

Hay un gran interés, tanto tecnológico como económico, en el desarrollo de soluciones para las WSNs. Estas soluciones, que son muy necesarias y tienen como objetivo el uso de los recursos disponibles de la red de la mejor forma posible, incluyen protocolos de comunicación para permitir acceso ordenado y sincronizado al medio de transmisión/recepción (MAC), así como para el descubrimiento del vecindario y enrutamiento inteligente, debido a la dinámica inherente de multi-salto de este tipo de redes.

Dado que la tecnología de WSN se desarrolla hacia tasas más altas de transmisión, tiene sentido pensar en el sensado y la transmisión de información en tiempo real, como audio y video. Estas aplicaciones necesitan que el sistema sea capaz de ofrecer garantías de calidad de servicio (QoS).

Además, la gente se ha dado cuenta de que la separación tradicional de los protocolos en capas, mediante la definición clara de los servicios que cada capa debe proveer y el aislamiento de la operación de cada capa, no es la mejor manera de proceder. En otras palabras, algunos investigadores han encontrado que el intercambio de información entre capas rinde un mejor desempeño que trabajando en aislamiento. Este descubrimiento ha dado origen a la noción del diseño de protocolos con comunicación entre capas (cross-layer).

El diseño de protocolos cross-layer se ha convertido en un tema tan importante que la revista IEEE Communications Magazine, la cual es una publicación que refleja el estado de arte en su campo y tiene gran influencia en el trabajo en todo el mundo en investigaciones en un futuro cercano, ha dedicado dos de sus publicaciones recientes (Diciembre 2005 y Enero 2006) a este tema. Artículos publicados en este tema incluyen la propuesta de asignación de recursos y métodos de calendarización para las WLANs basadas en OFDM [Song y Li, 2005], compromisos entre la eficiencia en la velocidad y un eficiente uso de la energía en los protocolos MAC [Fawal *et al.*, 2005], un método de traspaso rápido entre la WLAN y una red IP móvil basada en el conocimiento de la topología [Tseng *et al.*, 2005], un método para investigar el impacto de la capa física en la capa MAC en cuanto a la QoS que ofrece en la entrega de paquetes [Zhang *et al.*, 2006], así como arquitecturas en general para el diseño de protocolos cross-layer [Srivastava y Motani, 2005; Raisinghani *et al.*, 2006 y Winter *et al.*, 2006]. Las WSNs son ya una realidad, pero aún existe la necesidad de diseñar protocolos que aumenten su desempeño optimizando el uso de recursos.

I.1.1. Operación del proyecto global

Esta tesis de maestría es parte de un proyecto más general de enrutamiento [Molina López] y de acceso al medio [Ruiz Ibarra, 2006] que define protocolos para redes de sensores que toman en cuenta QoS y eficiencia de energía. A continuación se mencionan los puntos que se tienen que tomar en cuenta para el proyecto global y posteriormente se especificará cuál es la parte que le corresponde a este trabajo de tesis.

El trabajo global se enfoca principalmente a la eficiencia de energía y la entrega de paquetes que toman en cuenta requerimientos de calidad de servicio. Por nuestra investigación preliminar nos dimos cuenta de que debemos tomar los siguientes puntos en cuenta:

- El enrutamiento debe de ser una combinación del descubrimiento de un conjunto de posibles rutas entre cada nodo sensor y el sink, y la identificación y reservación de aquellas rutas que sean capaces de satisfacer los requerimientos de QoS.
- En las redes inalámbricas hay una dependencia intrínseca entre el ancho de banda de las trayectorias cercanas [Dong y Makrakis, 2006], lo cual significa que un nodo afectará y será afectado por las transmisiones de todos los nodos vecinos, aún si no son parte de una misma ruta y aún si se encuentran a más de un salto.

- Una manera de ahorrar energía y mejorar la escalabilidad es a través de la organización de nodos en agrupamientos para disminuir el número de mensajes de control que tienen que ser intercambiados entre los nodos para conocer la topología y para descubrir las rutas.
- La información en cuanto a quién necesita hablar con quién puede también ser útil para ahorrar energía, lo que se logra poniendo a los nodos que necesiten comunicarse entre sí en un mismo agrupamiento y asignando periodos de actividad diferentes a cada agrupamiento, lo que a su vez permite a cada nodo deshabilitar de manera segura el transmisor/receptor fuera del periodo de actividad y, como consecuencia, reducir la escucha inactiva y las colisiones.
- De los párrafos anteriores concluimos que los protocolos MAC de las WSNs pueden ser híbridos, combinando mecanismos de calendarización y mecanismos de contienda o encuesta; la calendarización está asociada con la asignación de ventanas de actividad a diferentes agrupamientos mediante TDMA estático, mientras que la contienda o encuesta están relacionados con el mecanismo usado por los nodos que pertenecen a un mismo agrupamiento para compartir el medio de transmisión.
- El ahorro de energía y el aseguramiento de QoS son entonces tareas que pueden ser realizadas de manera conjunta por la capa MAC y los mecanismos de enrutamiento.

I.1.2. Descripción del proyecto global

El trabajo global propone un protocolo cross-layer para el descubrimiento de topología, selección y reservación de ruta, así como mecanismos de control de acceso al medio para una red inalámbrica de sensores. Nuestro método consiste de una fase de configuración, en la cual no hay transmisiones de datos de aplicación, sino que sólo los mensajes de control son intercambiados entre los nodos, y una fase de operación normal, en la cual los nodos generan y transmiten datos al sink siguiendo trayectorias especificadas durante la fase de configuración. Estas dos fases se alternan periódicamente. El punto principal es ofrecer garantías de QoS y obtener eficiencia de energía. El enrutamiento y los protocolos MAC colaboran para alcanzar sus metas comunes a través de los pasos que describiremos abajo.

La propuesta del trabajo global supone que el sistema incluye uno o más nodos con capacidades especiales en términos de vida de batería, memoria, y poder de procesamiento, que serán los responsables de recibir, procesar y almacenar la información que es generada por los nodos sensores. Estos nodos, conocidos como sumideros o sinks, estarán activos alternadamente.

I.1.2.1. Descubrimiento de topología

El primer paso del protocolo propuesto por nuestro trabajo global es el descubrir la topología de la red y un conjunto de posibles rutas entre cada nodo sensor y el sink. Esto se logra mediante el protocolo OLSR [Clausen y Jacquet, 2003], el cual está basado en la

transmisión periódica de mensajes HELLO para descubrir vecinos a uno y dos saltos y en la difusión de mensajes TC para el descubrimiento de topología y cálculo de rutas. OLSR es un protocolo que toma la escalabilidad en cuenta reduciendo el número de mensajes de control transmitidos mediante el uso de MPRs. El protocolo MAC que se usa durante esta parte es DCF, como se describe en el estándar IEEE 802.11 [802.11, 1999].

I.1.2.2. Reservación de ruta

El segundo paso es la reservación de una de las rutas existentes entre cada nodo sensor y el sink activo actual. Empezará tan pronto como el nodo sensor descubra cómo alcanzar al sink. Como lo mencionamos arriba, cada nodo sensor se convertirá en una fuente de tráfico durante la operación normal del sistema, y la ruta seleccionada tiene que ser capaz de satisfacer los requerimientos de QoS del tráfico que será generado. Puede haber tráfico en la dirección opuesta (del sink hacia el nodo sensor), pero será menos intenso y no será de tiempo real, por lo que no es necesaria la reservación de recursos para este tráfico. Estamos convencidos de que garantizando una cierta cantidad de ancho de banda podremos asegurar la QoS, que puede estar especificada en términos de throughput, retardo o jitter. El ancho de banda necesario, el cual será denotado por $B_{\text{requerido}}$, puede ser determinado a través de un algoritmo de control de admisión (CAC), el cual está fuera del alcance de este trabajo global. Este ancho de banda puede ser pre-calculado y almacenado en los nodos como una función del número de saltos para alcanzar el sink.

Cada nodo sensor revisará las trayectorias existentes entre sí y el sink, empezando con la más corta, hasta que pueda encontrar una con suficiente ancho de banda para reservar. El procedimiento de reservación será como sigue. Primero, el nodo revisará si su ancho de banda disponible es al menos $B_{\text{requerido}}$. Si es así, reducirá su ancho de banda disponible por $B_{\text{requerido}}$ indicando que dicha cantidad ha sido reservada para mandar tráfico al siguiente nodo en la trayectoria. Después, mandará un mensaje al siguiente nodo ubicado en la trayectoria más corta no probada preguntando si está dispuesto a reservar el ancho de banda necesario para transmitir el tráfico generado por dicha fuente, y esperará por su acuse de recibo. Además, todos los nodos que puedan oír el mensaje también reducirán de manera acorde su ancho de banda disponible. Si esto no es posible, mandarán un mensaje de respuesta indicando que la conexión no puede ser establecida. Cuando esto pasa se tiene que probar una nueva trayectoria. Por otra parte, si nada sale mal, el próximo nodo en la trayectoria mandará un acuse de recibo como se espera y empezará de nuevo el mismo procedimiento. Si un nodo que no ha escuchado el mensaje original escucha el acuse, también reducirá su ancho de banda disponible por $B_{\text{requerido}}$ o mandará un mensaje indicando que no es posible. Los mensajes intercambiados para establecer una nueva conexión se asemejan a la secuencia que siguen los mensajes RTS/CTS en una WLAN IEEE 802.11, ya que tiene el objetivo de alcanzar a todo el conjunto de vecinos que interfieren potencialmente en cada salto.

Cuando un intento de reservación es exitoso, ambos nodos se convierten en parte de un agrupamiento y el nodo que acepta enviar el tráfico del nodo solicitante se convierte en la cabeza del agrupamiento. El agrupamiento crecerá conforme más nodos seleccionen la

misma cabeza de agrupamiento como el siguiente nodo en su ruta hacia el sink. En nuestra propuesta del trabajo global, un agrupamiento se define como un grupo de nodos que necesitan comunicarse directamente y se agrupan con el fin de coordinar los patrones de dormir y despertar de todos los nodos del agrupamiento. El ID del agrupamiento será el mismo que el de la cabeza del agrupamiento.

I.1.2.3. Identificación de los agrupamientos que interfieren

Tan pronto como un nodo consigue reservar ancho de banda y, por consecuencia, consigue ser miembro de un agrupamiento, empezará a difundir el ID del agrupamiento al que pertenece incluyéndolo en todos los mensajes HELLO subsecuentes. De esta manera, los nodos identificarán sus agrupamientos vecinos interferentes y, además, incluirán la lista de todos los agrupamientos interferentes en sus mensajes HELLO. De esta manera, cada cabeza de agrupamiento sabrá cuáles otros agrupamientos están interfiriendo con al menos uno de los miembros del agrupamiento del que él está a cargo.

I.1.2.4. Notificación al sink de agrupamientos interferentes

Aquellos MPRs que también son cabeza de agrupamiento almacenarán una lista de los agrupamientos interferentes y la incluirán en los mensajes TC que son enviados periódicamente. Esta información eventualmente alcanzará al sink, el cual la almacenará para ser usada después durante la asignación de ventanas de actividad a los agrupamientos.

I.1.2.5. Asignación de ventanas de actividad

Al final del proceso de reservación, como el sink es el último nodo de todas las trayectorias, tendrá una imagen de la estructura de árbol que forman las rutas que seguirá la información adquirida por los sensores, sabrá los requerimientos de ancho de banda de cada enlace entre dos nodos, y también sabrá cuáles agrupamientos interfieren con otros agrupamientos. Usando toda esta información, asignará ventanas de actividad de tamaño suficiente a los diferentes agrupamientos de forma que ellos no interfieran unos con otros. Para reducir el retardo que el tráfico experimentará para alcanzar el sink, los agrupamientos más lejanos serán programados primero y después los más cercanos. Para mejorar la eficiencia, el sink tratará de programar simultáneamente agrupamientos que no se interfieran. Los mensajes de asignación de ventanas de actividad serán enviados repetidamente para evitar pérdidas. Una vez que el sink ha anunciado a todos los agrupamientos su ventana de actividad correspondiente, difundirá un mensaje en broadcast indicando que la *fase de configuración* ha terminado y la *fase de operación normal* tiene que iniciar.

I.1.2.6. Fase de operación normal

En base a lo escrito anteriormente resulta evidente que hace falta un protocolo MAC para el intercambio de datos dentro de cada agrupamiento que sea suficientemente eficiente. El objetivo de este trabajo es el de definir el protocolo MAC que será usado durante la fase de operación normal dentro de la ventana de actividad de cada agrupamiento.

Como se describirá en detalle más adelante, este protocolo MAC estará basado en PCF, que a su vez se describe en el estándar IEEE 802.11 [802.11, 1999].

I.1.2.7. Reconfiguración

El ser cabeza del agrupamiento significa tener un consumo de energía mayor que los demás nodos en el agrupamiento, esto debido a que se tiene que permanecer despierto durante dos ventanas de actividad, y también debido a que, además de tener que enviar sus propios datos, tiene que enviar los que le mandaron los miembros de su agrupamiento, demandándole un trabajo mayor. Es por esto que los nodos se alternan para tomar el papel de cabeza de agrupamiento. Para hacer esto, después de un tiempo de trabajar en la *fase de operación normal*, el sink envía un mensaje de *reconfiguración* indicando que la transmisión de datos tiene que ser brevemente suspendida y que la fase de *configuración* tiene que empezar otra vez. Si hay varios sinks en el sistema, este mensaje también puede indicar cuál de ellos será el próximo sink activo. Los nodos actualizarán su disponibilidad para ser MPR (y posiblemente cabeza del agrupamiento) dependiendo de la energía que hayan gastado hasta ese momento.

El procedimiento de reconfiguración puede ser también iniciado si se detecta un problema grave en el sistema, como por ejemplo, la pérdida de la cabeza de un agrupamiento, lo que aislaría a un grupo de nodos del sink. Si esto pasara, un mensaje de *error* sería generado por el nodo que detectó el problema y se transmitiría por inundación a través de la red asegurándose de que llegara hasta el sink.

I.2. Planteamiento del problema

La limitación del suministro de energía en las redes de sensores ha motivado muchas investigaciones. Tales investigaciones pueden ser clasificadas en dos categorías generales, de acuerdo con las causas principales de consumo de energía: procesamiento de señales y protocolos de comunicación. El primer aspecto se aborda extendiendo la vida de la red a través del uso selectivo de un subconjunto de los sensores que están monitoreando el ambiente, y del paso de los sensores no seleccionados a un modo de baja energía (dormido). El objetivo es mantener suficientes sensores vivos para cubrir el área de interés durante el mayor tiempo posible. Este tipo de selección de sensores involucra técnicas de procesamiento de señales y el uso de información geográfica con el fin de asegurar una cobertura suficiente usando el menor número posible de sensores habilitados. El segundo aspecto se aborda mediante el diseño de sistemas de comunicación de radio que sean eficientes en el uso de energía. El simple encendido y apagado del transmisor y del receptor no es suficiente, ya que si se realiza la conmutación entre encendido y apagado con una frecuencia innecesariamente alta, se incurre también en desperdicio ya que el cambio mismo consume energía. Se corre también el riesgo de desactivar el sistema de comunicación durante períodos en que es necesario intercambiar información. Si el mecanismo de acceso al medio no está bien diseñado, habrá un número excesivo de colisiones, lo que implica de nuevo un uso ineficiente de energía dado el gran número de retransmisiones necesarias para lograr transmitir correctamente cada paquete. Es pues indispensable poner mucha atención al diseño del protocolo de acceso al medio (MAC).

En este trabajo se aborda el segundo aspecto para el ahorro de energía, y el problema que se va a resolver es el de encontrar un protocolo MAC que pueda hacer uso de la información generada en la etapa de configuración para transmitir de manera eficiente los datos sensados en la etapa de operación normal del sistema, permitiendo a los nodos despertar de manera sincronizada, e irse a dormir cuando ya no haya información por transmitir o cuando la ventana de actividad se haya terminado. Se parte de la hipótesis de que un protocolo basado en PCF, con períodos de dormir cuidadosamente programados, puede ser la solución.

I.3. Objetivos

En el presente trabajo de tesis se propone analizar propuestas existentes de mecanismos de control de acceso al medio (MAC) para redes de sensores basados en CSMA/CA y evaluar su desempeño en cuanto a su capacidad de proporcionar garantías de entrega de paquetes dentro de intervalos de tiempo predeterminados, es decir que puedan ser usados en ambientes de tiempo real, además de ser eficientes en el consumo de energía. La finalidad es conocer las opciones que existen en redes de sensores en cuanto a consumo de energía y calidad de servicio, logrando con esto proponer un mecanismo novedoso que conjugue las ventajas ya existentes y eliminen algunos de sus problemas, finalizando en un protocolo de control de acceso al medio (MAC) con mejor desempeño.

I.4. Infraestructura

Para la implementación, simulación y análisis de los algoritmos que serán presentados en los siguientes capítulos de este trabajo de tesis, se contó con la siguiente infraestructura, que en su mayor parte fue proporcionada por el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) y que a continuación se enlista:

- Computadora personal COMPAQ Presario R3000 AMD Athlon(tm) 64 Processor 3200+ a 2.79 GHz, 1.25 GB de RAM y 60 GB de disco duro.
- Conexión a Internet.
- Biblioteca CICESE.
- Biblioteca de la Universidad de California en San Diego.
- Supercomputadora con sistema operativo Sun.
- Herramienta de simulación OPNET Modeler versión 11.5.A PL3, de la compañía OPNET Technologies Inc.
- Lenguaje de programación Microsoft Visual C++ versión 6.0.
- Programas de aplicación tales como: Microsoft Word, Microsoft Powerpoint, Microsoft Visio, Internet Explorer, Reflection X versión 10.0.0, Adobe Acrobat 6.0 Professional.

I.5. Trabajos previos

Las redes inalámbricas de sensores están teniendo un gran auge y presentan nuevos retos para los investigadores en comunicaciones inalámbricas. Por tal motivo se han realizado

numerosas investigaciones y propuestas para mejorarlas. La mayoría de los trabajos propuestos son referentes al ahorro de energía en la capa MAC utilizando esquemas basados en contienda o libres de ésta.

Singh y Raghavendra (1998) describen un protocolo basado en contienda diseñado para redes ad hoc con el objetivo primario de que ahorre energía. PAMAS es un protocolo que suministra canales separados para los paquetes de control RTS/CTS y para los paquetes de datos, logrando con esto evitar el oír sin querer entre nodos vecinos. En PAMAS un nodo con un paquete para transmitir envía un mensaje RTS sobre el canal de control y espera por el mensaje de respuesta CTS proveniente del nodo receptor. Si el CTS es recibido, entonces el nodo transmite el paquete sobre el canal de datos. Con el inicio del acuse de recibo del paquete de datos, el nodo receptor transmite un tono de ocupado sobre el canal de control, así los nodos vecinos sincronizan el canal de control para conocer que el canal de datos está ocupado. El uso de un canal separado de señalización permite que los nodos determinen cuando y por cuánto tiempo se apagaran. La desventaja es que este protocolo requiere que los nodos tengan 2 canales separados (control y datos), el cual requerirá dos radios en cada nodo incrementando el costo, tamaño y complejidad en el diseño del sensor.

Poon y Li (2003) proponen el algoritmo SmartNode, el cual utiliza el mismo procedimiento de RTS/CTS/DATA/ACK como en IEEE 802.11, con la diferencia de que este algoritmo utiliza ajustes dinámicos de energía para conservar dicha energía, además permite un mejor reuso espacial del espectro y reduce niveles de contención dentro del área local. SmartNode intenta usar la mínima energía de transmisión para alcanzar a otro nodo, con suficiente

energía para recibir paquetes y registrar la información calculada en una tabla local. Cada nodo en este algoritmo mantiene una tabla en la cual almacenan el valor de la energía mínima requerida para poder alcanzar a sus vecinos. Antes de que el nodo fuente transmita un paquete de datos, busca al nodo destino en su tabla, si lo encuentra utiliza el valor de la energía almacenada, si no lo encuentra entonces transmite el paquete RTS con el máximo nivel de energía. Un campo adicional es añadido al paquete RTS para almacenar el valor de la energía de transmisión usada. Con el fin de mantener compatibilidad con IEEE 802.11 el nodo destino transmite sin modificar el paquete CTS con el mismo valor de energía indicada en el paquete RTS. La desventaja de usar diferentes niveles de transmisión es que incrementan la tasa de colisión de la red.

Li *et al.* (2005) proponen dos algoritmos para controlar y explotar la presencia de múltiples horarios reduciendo el consumo de energía y retardo. El primero es el algoritmo de calendarización global el cual es un algoritmo de distribución completa que permite a una gran red converger a un horario global para conservar energía. El segundo es el algoritmo de trayectoria rápida el cual suministra rápidos reenvíos de datos a las trayectorias para añadir periodos adicionales de despertar en los nodos a lo largo de las trayectorias de la fuente al SINK (sumidero de información). Esta propuesta no toma en cuenta que la propagación de radio es impredecible, lo que significa que el paquete de control no siempre es recibido por el nodo y en la mayoría del experimento falla.

Finalmente Ye *et al.* (2002) describen un protocolo basado en contienda cuyo principal objetivo es conservar la energía en las redes de sensores. SMAC establece un ciclo de

trabajo bajo para la operación de los nodos, además reduce el escuchar inactivamente mediante la desactivación periódica de los nodos, apagando completamente el transmisor/receptor. Cada nodo tiene su calendario para dormir y despertar. Cuando un nodo quiere comunicarse con otro, le enviará los datos en el período en que está despierto. Una vez que se ha establecido la comunicación entre un par de nodos, se mantendrán despiertos, sin respetar su calendario de dormir y despertar, hasta que hayan intercambiado toda la información que necesitaban. SMAC utiliza el mismo procedimiento RTS/CTS/DATA/ACK como en IEEE 802.11. La escalabilidad de SMAC es cuestionable, ya que la planeación del tiempo en que duermen los nodos puede ser una sobrecarga en redes grandes y el retardo fin-a-fin para la entrega de paquetes puede ser impredecible. Este artículo es la motivación de nuestro trabajo, solo que en esta tesis se toma en cuenta la calidad de servicio QoS, además de que los nodos tendrán la posibilidad de estar en un modo de baja energía (dormidos) por un tiempo mayor, esto debido a que un nodo que no tenga nada que transmitir se irá a dormir antes que los demás miembros de su agrupamiento, evitando mantener despiertos a nodos innecesariamente y logrando con ello alargar la vida de la red con lo cual se pretende mejorar los resultados obtenidos en SMAC.

I.6. Organización de la tesis

El contenido de este trabajo está organizado de la siguiente forma:

En el capítulo II se presenta una introducción a las redes locales inalámbricas del tipo IEEE 802.11, los componentes que las forman, los tipos de redes que existen y su capa física.

También se incluye una introducción a la capa MAC de dicho estándar, en donde se explican los dos mecanismos de acceso al medio llamados DCF y PCF. Se explica el problema del nodo oculto, y los espacios intertramas existentes.

En el capítulo III se presenta una introducción a las redes inalámbricas del tipo IEEE 802.15.4. Se mencionan las características únicas de las redes inalámbricas de sensores, ¿por qué es importante el diseño de la capa MAC?, los esquemas MAC más utilizados, la necesidad de la calidad de servicio considerando la eficiencia de energía, y como se clasifican y comparan los protocolos MAC. También se incluye la capa física y la capa de enlace de datos.

En el capítulo IV se presenta el funcionamiento de la PCF en OPNET. Además se describe la propuesta de este trabajo de tesis, en donde se menciona qué partes fueron modificadas de la PCF, a lo que llamamos PCF + Dormir. Se hace mención sobre que consideraciones se están tomando en cuenta para que los nodos se vayan a dormir.

En el capítulo V primero se da una descripción del modelo de simulación del protocolo MAC del estándar IEEE 802.11 en el cual se basó la realización de este trabajo de tesis modificándolo para ser acorde con las redes de sensores, esta descripción incluye las partes más importantes del modelo y como funcionan cada una de ellas. Se muestran los parámetros utilizados en nuestro modelo para ejecutar su simulación. Finalmente se analizan y comentan los resultados obtenidos en la ejecución de dichas simulaciones, a través de gráficas con diferentes parámetros.

En el capítulo VI se presentan las principales conclusiones de este trabajo, así como extensiones que podrían realizarse en trabajos futuros de investigación.

II. REDES LOCALES INALÁMBRICAS 802.11

Entre menos se lee, más daño hace lo que se lee.

--Miguel de Unamuno

II.1. Introducción

Esta sección fue elaborada principalmente de las referencias [802.11, 1999; 802.15.4, 2003; Medina Castro, 2004 y Meza Múgica, 2003].

Casi al mismo tiempo que aparecieron las computadoras portátiles, muchas personas tuvieron el sueño de andar por la oficina y poder conectar a Internet su computadora. En consecuencia, varios grupos empezaron a trabajar para cumplir con esta meta. El método

más práctico es equipar las computadoras de la oficina y las portátiles con transmisores y receptores de radio de onda corta que les permita comunicarse. Este trabajo condujo rápidamente a que varias empresas empezaran a comercializar las LANs (redes de área local) inalámbricas.

El problema es que no había compatibilidad entre ninguna de ellas. Esta proliferación de estándares implicaba que una computadora equipada con un radio de marca X no funcionara en un cuarto equipado con una estación de base marca Y. Finalmente, la industria decidió que un estándar de LAN inalámbrica sería una buena idea, por lo que al comité del IEEE que estandarizó las LANs alámbricas se le encargó la tarea de diseñar un estándar para LANs inalámbricas. El estándar resultante se llamó 802.11.

La primera decisión fue la más sencilla: cómo llamarlo. Todos los otros estándares LAN tenían números como 802.1, 802.2, hasta 802.10, por lo que el estándar LAN se llamó o publicó como 802.11. El resto fue más difícil.

En particular, varios de los diversos retos que había que enfrentar eran: encontrar una banda de frecuencia adecuada, de preferencia mundial; enfrentar el hecho de que las señales de radio tienen un rango finito; asegurarse de que se mantuviera la privacidad de los usuarios; tomar en cuenta la vida limitada de las baterías; preocuparse por la seguridad humana (¿las ondas de radio causan cáncer?); comprender las implicaciones de la movilidad de las computadoras y, por último, construir un sistema con suficiente ancho de banda para que sea económicamente viable.

Cuando empezó el proceso de estandarización (a mediados de la década de 1990), Ethernet ya había llegado a dominar las redes de área local, por lo que el comité decidió hacer que el 802.11 fuera compatible con Ethernet sobre la capa de enlace de datos. En particular, se podría enviar un paquete IP sobre la LAN inalámbrica del mismo modo en que una computadora conectada mediante cable enviaba un paquete IP a través de Ethernet. No obstante, existen algunas diferencias inherentes con Ethernet en las capas física y de enlace de datos y tuvieron que manejarse mediante el estándar.

Después de algún trabajo, el comité se presentó en 1997 con un estándar. La LAN inalámbrica descrita se ejecutaba a 1 o 2 Mbps. Casi de inmediato la gente comenzó a quejarse de que era demasiado lenta, de manera que empezaron a trabajar en estándares más rápidos. Una división desarrollada con el comité tuvo como resultado dos nuevos estándares en 1999. El estándar 802.11a utiliza una banda de frecuencia más ancha y se ejecuta a velocidades de hasta 54 Mbps. El estándar 802.11b utiliza la misma banda de frecuencia que el 802.11, pero se vale de una técnica de modulación diferente para alcanzar 11 Mbps. Finalmente el comité 802 ha creado otra variante, el 802.11g, que utiliza la técnica de modulación del 802.11a pero la banda de frecuencia del 802.11b.

II.2. Arquitectura de IEEE 802.11

El componente elemental de una red LAN inalámbrica 802.11 es un conjunto básico de servicios (BSS, *Basic Service Set*), consistente en un número de estaciones ejecutando el mismo protocolo MAC y compitiendo por el acceso al mismo medio inalámbrico

compartido. Un BSS puede funcionar aisladamente o bien estar conectado a un sistema troncal de distribución (DS, *Distribution System*) a través de un coordinador puntual (PC) que efectúa las funciones de puente. El protocolo MAC puede ser completamente distribuido o bien estar controlado por una función central de coordinación ubicada en el coordinador puntual. El DS puede ser un conmutador, una red cableada tradicional u otra red inalámbrica.

Redes independientes

Las redes independientes son llamadas IBSS (*Independent Basic Service Set*). En estas redes las estaciones se comunican directamente entre ellas. En la figura 1 se muestra un ejemplo de este tipo de redes. La red 802.11 más pequeña posible es una IBSS con dos estaciones. Generalmente, las IBSSs están compuestas de un pequeño número de estaciones establecidas para un propósito específico y por un periodo corto de tiempo. Debido a su corta duración, tamaño pequeño y propósito específico, las IBSS algunas veces son llamadas BSS ad hoc o redes ad hoc.

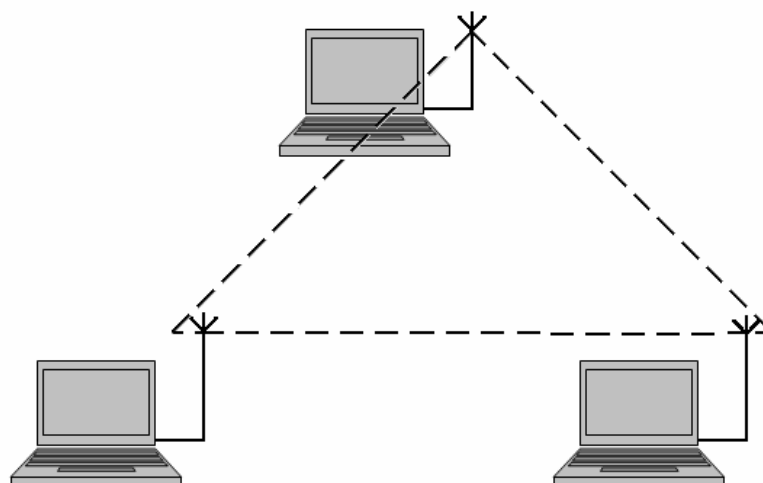


Figura 1 BSS independiente.

Redes de infraestructura

La figura 2 muestra una red BSS de infraestructura. Las redes de infraestructura se distinguen por el uso de un coordinador puntual (PC). Los coordinadores puntuales son utilizados para todas las comunicaciones en redes de infraestructura, incluyendo comunicaciones entre nodos móviles en la misma área de servicio. Si una estación móvil en una BSS de infraestructura se quiere comunicar con una segunda estación, generalmente la comunicación toma dos saltos. Primero, la estación móvil origen transfiere la trama al coordinador puntual. Segundo, el coordinador puntual transmite la trama a la estación destino. El área de servicio básico correspondiente a una BSS de infraestructura está definida por los puntos en los cuales las transmisiones del coordinador puntual pueden ser recibidas.

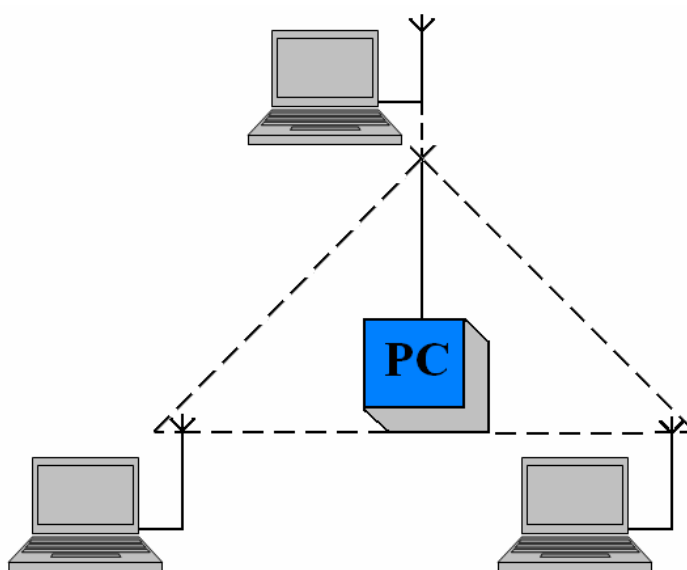


Figura 2 BSS de Infraestructura.

Áreas de servicio extendidas

Las BSSs pueden proveer cobertura en pequeñas oficinas o en casas, pero no pueden ofrecer cobertura de red a grandes áreas. 802.11 permite crear redes inalámbricas de tamaño arbitrariamente grande mediante el uso de enlaces de BSSs dentro de un conjunto extendido de servicio (ESS, *Extended Service Set*). Un ESS es creado concatenando BSSs a través de una red dorsal (backbone). En la figura 3, el ESS es la unión de tres BSSs. El área de cobertura total del ESS es llamada Área de Servicio Extendido (ESA).

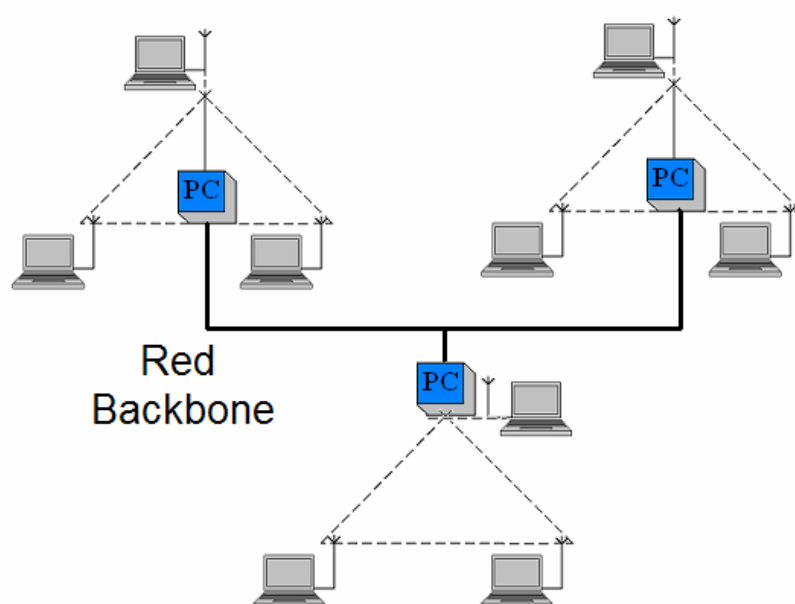


Figura 3 Conjunto de servicio extendido.

Sistema de Distribución

El sistema de distribución provee movilidad conectando los coordinadores puntuales. Es el responsable de dar seguimiento a la localización física de una estación y entregar las tramas apropiadamente. La red dorsal (backbone) es el medio del sistema de distribución pero no es todo el sistema de distribución.

La mayoría de los coordinadores puntuales operan como puentes. Ellos tienen por lo menos una interfaz de red inalámbrica y una interfaz de red cableada (por ejemplo Ethernet). El extremo cableado puede estar conectado a una red existente, y el lado inalámbrico se convierte en una extensión de esa red. La figura 4 muestra la relación entre el coordinador

puntual, la red backbone y el sistema de distribución. El sistema de distribución en esta figura está compuesto por el puente (componente del coordinador puntual) y la red cableada backbone.

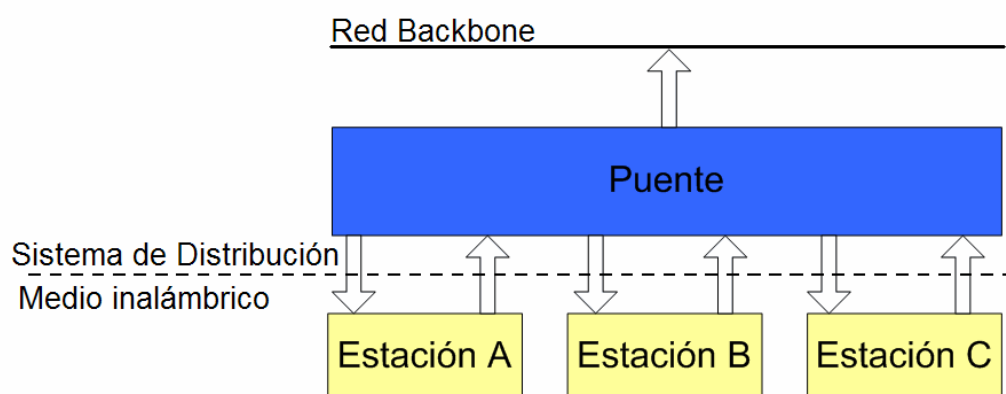


Figura 4 Sistema de distribución.

II.3. Servicios de IEEE 802.11

La normativa IEEE 802.11 define nueve servicios que deben ser proporcionados por una red inalámbrica para ofrecer una funcionalidad equivalente a la inherente a una LAN cableada tradicional. En la tabla I se enumeran estos servicios y se indican dos formas de categorizarlos.

1. El proveedor de servicios puede ser tanto la estación como el DS. Los servicios de la estación son implementados en cada estación IEEE 802.11, incluyendo la estación que constituye el PC. Los servicios de distribución son proporcionados entre BSS diferentes y

deben ser implementados en un PC o en cualquier otro dispositivo de propósito específico conectado al sistema de distribución.

2. Tres de los servicios enumerados se emplean para controlar el acceso a una LAN IEEE 802.11 y para proporcionar confidencialidad. Los seis servicios restantes dan soporte a la entrega de unidades de datos de servicio MAC (MSDU, *MAC Service Data Units*) entre estaciones. Una MSDU es un bloque de datos que el usuario MAC le pasa a la capa MAC, generalmente en la forma de una PDU LLC. Si una MSDU es demasiado grande para ser transmitida en una sola trama MAC, puede ser fragmentada y transmitida en una serie de tramas. La fragmentación se discutirá mas adelante en esta misma sección.

Tabla I Servicio de IEEE 802.11

| Servicio | Proveedor | Usado para dar soporte a |
|-------------------------|-------------------------|---------------------------------|
| Asociación | Sistema de distribución | Entrega de MSDU |
| Autenticación | Estación | Acceso a la LAN y seguridad |
| Fin de la autenticación | Estación | Acceso a la LAN y seguridad |
| Disociación | Sistema de distribución | Entrega de MSDU |
| Distribución | Sistema de distribución | Entrega de MSDU |
| Integración | Sistema de distribución | Entrega de MSDU |
| Entrega de MSDU | Estación | Entrega de MSDU |
| Privacidad | Estación | Acceso a la LAN y seguridad |
| Reasociación | Sistema de distribución | Entrega de MSDU |

Distribución de mensajes dentro de un DS

Los dos servicios implicados en la distribución de mensajes dentro de un DS son la distribución y la integración. La distribución es el servicio primario utilizado por las estaciones para intercambiar tramas MAC cuando la trama debe atravesar el DS para pasar de una estación en un BSS a otra estación en un BSS diferente. El servicio de integración permite la transferencia de datos entre una estación situada en una LAN IEEE 802.11 y otra estación en una LAN IEEE 802.x que se encuentre integrada con la primera. El término integrada hace referencia a una LAN cableada que esté físicamente conectada con el DS y cuyas estaciones puedan conectarse de forma lógica a una LAN IEEE 802.11 a través del servicio de integración. Este servicio es el encargado de llevar a cabo la traducción de direcciones y cualquier otra conversión lógica requerida para el intercambio de datos.

Servicios relacionados con la asociación

El principal objetivo de la capa MAC es la transferencia de MSDU entre entidades MAC. Esta tarea es desempeñada por el servicio de distribución. Para que este servicio pueda llevar a cabo sus funciones, necesita disponer de información acerca de las estaciones que se encuentran dentro del ESS. Esta información es la proporcionada por los servicios relacionados con la asociación. Antes de que el servicio de distribución pueda entregar o aceptar datos de una estación, ésta debe estar asociada. Antes de explorar la noción de asociación es necesario describir el concepto de movilidad. El estándar define tres tipos de transiciones basadas en la movilidad:

- ***Sin transición:*** una estación de este tipo es estacionaria o se desplaza únicamente dentro del rango de comunicación directa de las estaciones conectadas a un solo BSS.
- ***Transición BSS:*** se define como el desplazamiento de una estación desde un BSS hasta otro BSS de destino ubicado en el mismo ESS. En este caso, la entrega de datos a la estación necesita que la función de direccionamiento sea capaz de reconocer la nueva localización de la estación.
- ***Transición ESS:*** se define como el desplazamiento de una estación desde un BSS ubicado en un determinado ESS hasta otro BSS perteneciente a un ESS diferente del primero. Esta situación se soporta únicamente debido a que la estación tiene libertad para moverse. Sin embargo, el mantenimiento de conexiones de capas altas sustentadas sobre 802.11 no puede garantizarse. De hecho, es probable que se produzca una interrupción del servicio.

Para entregar un mensaje dentro de un DS, el servicio de distribución necesita conocer dónde se encuentra ubicada la estación destino. Específicamente, el DS necesita conocer la identidad del PC al que el mensaje deberá ser entregado con objeto de que tal mensaje alcance la estación de destino. Para satisfacer este requisito, una estación debe mantener una asociación con el PC dentro de su BSS actual. Existen tres servicios vinculados con este requisito:

- **Asociación:** establece una asociación inicial entre una estación y un PC. La identidad y dirección de una estación deben conocerse antes de que la misma pueda transmitir o recibir tramas en una LAN inalámbrica. Para ello, una estación debe establecer una asociación con un PC perteneciente a un BSS particular. A partir de entonces, el PC puede comunicar esta información a otros PC dentro del ESS con objeto de facilitar el encaminamiento y la entrega de tramas.
- **Reasociación:** permite que una asociación previamente establecida sea transferida desde un PC hasta otro, haciendo así posible que una estación móvil pueda desplazarse desde un BSS hasta otro.
- **Disociación:** constituye una notificación, bien de una estación o bien por parte de un PC, de que una asociación existente deja de tener validez. Una estación debería proporcionar este aviso antes de abandonar un ESS o apagarse. No obstante, las funciones de gestión MAC incluyen mecanismos para protegerse frente a estaciones que desaparezcan sin emitir esta notificación.

Servicios de acceso y privacidad

Existen dos características de una LAN cableada que no son inherentes a una LAN inalámbrica:

1. Para poder transmitir sobre una LAN cableada, una estación debe estar físicamente conectada a la misma. Sin embargo, en el caso de una red inalámbrica, cualquier estación situada dentro de un rango similar al de otros dispositivos de la red puede transmitir. Existe, en cierto sentido, una forma de autenticación en el contexto de una red cableada: se precisa una acción positiva y presumiblemente observable para conectar una estación a una LAN cableada.

2. Análogamente, con objeto de recibir una transmisión desde una estación que forma parte de una LAN cableada, la estación receptora debe igualmente estar conectada al medio. Sin embargo, en el caso de una red inalámbrica cualquier estación dentro del rango apropiado puede recibir. De esta forma, una LAN cableada proporciona cierto grado de privacidad, limitando la recepción de datos únicamente a aquellas estaciones conectadas a la LAN.

El estándar IEEE 802.11 define tres servicios que proporcionan estas dos características a una LAN inalámbrica:

- **Autenticación:** es utilizada para que una estación pueda comunicar su identidad a otras estaciones. El estándar IEEE 802.11 da soporte a varios esquemas de autenticación y permite que la funcionalidad de los mismos pueda extenderse. El estándar no impone ningún esquema de autenticación concreto, que podría ir desde algún procedimiento relativamente inseguro hasta esquemas de cifrado de llave pública. Sin embargo, el estándar

IEEE 802.11 precisa de una autenticación correcta y aceptada mutuamente antes de que una estación pueda establecer una asociación con un PC.

- **Fin de la autenticación:** este servicio es invocado siempre que se vaya a dar por finalizada una autenticación existente.
- **Privacidad:** se utiliza para asegurar que los contenidos de los mensajes no sean leídos por alguien diferente al receptor legítimo. El estándar incluye el uso opcional de mecanismos de cifrado para asegurar la privacidad.

II.4. La pila de protocolos de 802.11

Los protocolos utilizados por todas las variantes 802, entre ellas Ethernet, tienen ciertas similitudes de estructura. En la figura 5 se muestra una vista parcial de la pila de protocolos del estándar 802.11. La capa física corresponde muy bien con la capa física OSI, pero la capa de enlace de datos de todos los protocolos 802 se divide en dos o más subcapas. En el estándar 802.11, la subcapa MAC determina la forma en que se asigna el canal, es decir, a quién le toca transmitir a continuación. Arriba de dicha subcapa se encuentra la subcapa LLC, cuyo trabajo es ocultar las diferencias entre las variantes 802 con el propósito de que sean imperceptibles para la capa de red.

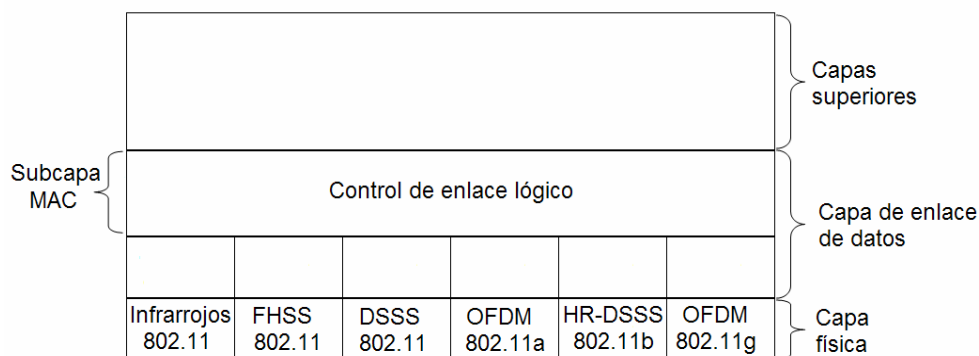


Figura 5 Parte de la pila de protocolos del 802.11.

El estándar 802.11 de 1997 especifica tres técnicas de transmisión permitidas en la capa física. El método de infrarrojos utiliza en su mayor parte la misma tecnología que los controles remotos de televisión. Los otros dos métodos utilizan el radio de corto alcance, mediante técnicas conocidas como FHSS y DSSS. Éstas utilizan parte del resto del espectro que no necesita licencia (la banda ISM de 2.4 GHz). Los abridores de puertas de cocheras controlados por radio también utilizan esta parte de la cochera. Los teléfonos inalámbricos y los hornos de microondas también utilizan esta banda. Todas estas técnicas funcionan a 1 o 2 Mbps y con poca energía por lo que no interfieren mucho entre sí. En 1999 se introdujeron dos nuevas técnicas para alcanzar un ancho de banda más alto. Éstas se conocen como OFDM y HRDSSS. Funcionan hasta 54 y 11 Mbps, respectivamente. En 2001 se introdujo una segunda modificación OFDM, pero en la banda de frecuencia diferente respecto a la primera.

II.5. La capa física de 802.11

En el estándar original 802.11 se definen tres medios físicos:

- Espectro expandido de secuencia directa (DS-SS) funcionando en la banda ISM de los 2.4 GHz, con velocidades de datos de 1 Mbps y 2 Mbps.
- Espectro expandido con salto en frecuencia (FH-SS) funcionando en la banda ISM de los 2.4 GHz, con velocidades de datos de 1 Mbps y 2 Mbps.
- Infrarrojos a 1 Mbps Y 2 Mbps funcionando con longitudes de onda entre 850 nm y 950 nm.

Espectro expandido en secuencia directa

En el sistema DS-SS pueden utilizarse hasta siete canales, cada uno con una velocidad de datos de 1 Mbps o 2 Mbps. El número de canales disponible depende del ancho de banda reservado por las diversas agencias reguladoras. Éste puede variar desde los 13 disponibles en la mayoría de los países europeos hasta solamente 1 disponible en Japón. Cada canal tiene un ancho de banda de 5 MHz. El esquema de codificación utilizado es DBPSK para velocidades de 1 Mbps y DQPSK para el caso de 2 Mbps.

Espacio expandido con salto de frecuencias

Un sistema FH-SS hace uso de varios canales, saltando la señal de un canal a otro de acuerdo con una secuencia pseudoaleatoria. En el caso del esquema IEEE 802.11, se

utilizan canales de 1 MHz. El número de canales disponibles varía desde 23 en Japón hasta 70 en los Estados Unidos.

Para la modulación, el esquema FH-SS utiliza GFSK de dos niveles para el sistema a 1 Mbps. Los bits cero y uno se codifican como desviaciones de la frecuencia portadora actual. Para el sistema a 2 Mbps se utiliza un esquema GFSK de cuatro niveles en el que las cuatro combinaciones de 2 bits se definen mediante cuatro desviaciones diferentes de la frecuencia central.

Infrarrojos

El esquema de infrarrojos en IEEE 802.11 es omnidireccional en lugar de punto a punto, siendo posible cubrir distancias de hasta 20 m. El esquema de modulación para velocidades de datos de 1 Mbps se conoce como PPM-16 (*Pulse Position Modulation*). En este esquema, cada grupo de 4 bits de datos se transforma en uno de los 16 símbolos PPM, siendo cada símbolo una cadena de 16 bits. Cada cadena de 16 bits consta de quince ceros y un uno binario. En el caso de 2 Mbps, cada grupo de 2 bits se transforma en una de cuatro posibles secuencias de 4 bits. Cada secuencia consta de tres ceros y un uno binario. La transmisión real emplea un esquema de modulación en intensidad en el que la presencia de señal se corresponde con un 1 binario y la ausencia de la misma con un 0 binario.

IEEE 802.11a

La especificación IEEE 802.11a hace uso de la banda de los 5 GHz. Al contrario que en el caso de las especificaciones en la banda de los 2.4 GHz, en IEEE 802.11a no se emplea un

esquema de espectro expandido, sino multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). OFDM, también conocido como modulación multiportadora, utiliza varias señales portadoras con frecuencias diferentes, enviando algunos de los bits totales por cada canal. Se trata de un esquema similar a FDM. Sin embargo, en el caso de OFDM todos los subcanales están dedicados a una única fuente de datos.

Las velocidades de datos posibles en IEEE 802.11a son 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 y 54 Mbps. El sistema utiliza hasta 52 subportadoras que se modulan usando BPSK, QPSK, QAM-16 o QAM-64, en función de la velocidad requerida. El espaciado entre frecuencias subportadoras es de 0.3125 MHz. Un código convolucional a una tasa de $\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$ o $\frac{3}{4}$ proporciona corrección de errores hacia delante.

IEEE 802.11b

IEEE 802.11b es una extensión del esquema IEEE 802.11 DS-SS, proporcionando velocidades de datos de 5.5 y 11 Mbps. La tasa de minibits es de 11 MHz, la misma que el esquema DS-SS original, proporcionando así el mismo ancho de banda ocupado. Para conseguir una velocidad de datos mayor en el mismo ancho de banda y con la misma tasa de minibits se utiliza un esquema de modulación conocido como modulación por código complementario (CCK, *Complementary Code Keying*).

IEEE 802.11g

IEEE 802.11g es una extensión de IEEE 802.11b a mayor velocidad. Este esquema combina toda una gama de técnicas de codificación del medio físico utilizadas en 802.11a y 802.11b para proporcionar servicios a diversas velocidades de datos.

II.6. El protocolo de la subcapa MAC de 802.11

La primera función del protocolo MAC es proveer un servicio de envío seguro de datos a los usuarios.

La segunda función del MAC del estándar IEEE 802.11 es ofrecer un control de acceso al medio inalámbrico compartido. Esta función la realiza a través de dos mecanismos de acceso diferentes: el mecanismo de acceso básico, llamado Función de Coordinación Distribuida (DCF, *Distributed Coordination Function*), y el mecanismo de acceso centralmente controlado, llamado Función de Coordinación Puntual (PCF, *Point Coordination Function*). En la figura 6 se ilustra las funciones de coordinación.

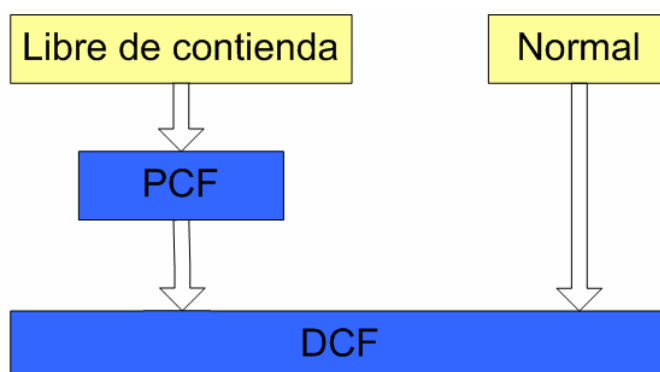


Figura 6 Funciones de coordinación de la MAC.

DCF

La DCF es la base del mecanismo de acceso CSMA/CA. Como en Ethernet, primero verifica que el canal de radio esté libre antes de transmitir. Para evitar las colisiones, las estaciones utilizan un intervalo de espera de tamaño aleatorio después de cada trama (backoff). En algunos casos, la DCF puede usar la técnica de CTS/RTS para reducir más la posibilidad de colisión.

PCF

La función PCF provee un servicio libre de contienda. Se utilizan estaciones especiales llamadas coordinadores puntuales (PC, *Point Coordinator*) para asegurar que el medio sea asignado sin contienda. La función PCF está restringida para redes de infraestructura. Para tener acceso prioritario al canal inalámbrico, las estaciones que transmiten utilizando la función PCF, lo hacen dejando pausas más pequeñas entre transmisiones que las necesarias

para que una estación DCF considere que el canal está libre para poder iniciar su transmisión.

II.6.1. Protocolo de intercambio de trama MAC

Al igual que cualquier otra red inalámbrica, una LAN inalámbrica que utilice las capas física y MAC especificadas en el estándar IEEE 802.11 está sujeta a una considerable falta de fiabilidad. El ruido, las interferencias, y otros efectos de propagación repercuten en la pérdida de un número significativo de tramas. Incluso disponiendo de códigos correctores de errores, es posible que muchas tramas MAC no sean recibidas apropiadamente. Se puede hacer frente a esta situación con mecanismos que proporcionen fiabilidad en capas más altas, como TCP. Sin embargo, los contadores de tiempo utilizados para la retransmisión en capas superiores son, por lo general, del orden de segundos. Es, por tanto, más eficiente abordar el problema de los errores en el nivel MAC. Con esta finalidad, el estándar IEEE 802.11 incluye un protocolo de intercambio de tramas. Cuando una estación recibe una trama de datos de otra estación, devuelve una trama de confirmación (ACK) a la estación origen. Este intercambio es tratado como una unidad atómica, sin ser interrumpido por una transmisión procedente de cualquier otra estación. Si la fuente no recibe la confirmación en un intervalo corto de tiempo, bien porque la trama de datos resultó dañada, o bien porque lo fue la trama de ACK de retorno, la fuente retransmite la trama. De esta forma, el mecanismo básico de transferencia de datos en IEEE 802.11 implica un intercambio de dos tramas.

II.6.2. El problema del nodo oculto

Este problema es un resultado del hecho de que no todas las estaciones de una WLAN pueden comunicarse directamente con cada una de las otras estaciones de la misma red. En la figura 7, el nodo 2 puede comunicarse con ambos nodos 1 y 3, pero los nodos 1 y 3 no se pueden comunicar directamente. Desde la perspectiva del nodo 1, el nodo 3 es un nodo oculto. Si el nodo 1 transmite una trama al nodo 2, la trama podría ser corrompida por una transmisión iniciada por el nodo 3 hacia el nodo 2. El nodo 3 desconocerá por completo la transmisión iniciada por el nodo 1 al nodo 2.

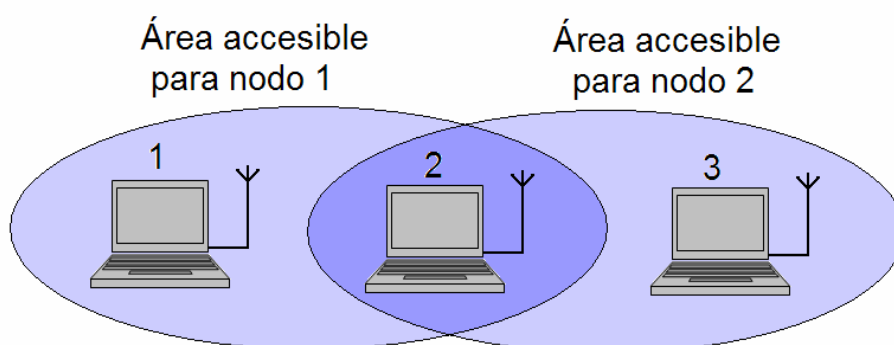


Figura 7 Problema del nodo oculto, los nodos 1 y 3 son ocultos.

El protocolo de intercambio de trama del MAC de IEEE 802.11 soluciona este problema agregando dos tramas adicionales al protocolo de intercambio de trama mínimo descrito hasta ahora. Las dos tramas son: la trama de petición de envío (RTS, *Request to Send*) y la trama de libre para envío (CTS, *Clear to Send*). La fuente envía una trama RTS al destino. El destino envía una trama CTS a la fuente. Estas tramas contienen información que

permite a las otras estaciones que las reciben, es decir, que están dentro del área de cobertura, estar notificadas de las transmisiones próximas de nuevas tramas y retrasar cualquier transmisión que fueran a realizar y que pudiera causar interferencia. Cuando la fuente recibe la trama CTS del destino, se envía la trama que realmente se quiere enviar al destino. Si la trama se recibe correctamente en el destino, el destino regresa un reconocimiento, completando así el protocolo de intercambio de trama. La figura 8 muestra el procedimiento. Dependiendo de la configuración de una estación y la determinación de sus condiciones locales, la estación seleccionará cuándo utilizar las tramas RTS y CTS.

Las cuatro tramas de este protocolo son también una unidad atómica del protocolo MAC. No pueden ser interrumpidas por la transmisión de otras estaciones. Si este intercambio de trama falla en cualquier punto, el estado de intercambio y la información que contiene cada trama permite a las estaciones que las han recibido, recobrar y retomar el control del medio en una cantidad mínima de tiempo.

Una estación en las cercanías de la estación fuente que recibe una trama RTS retardará cualquier transmisión hasta que reciba la trama anunciada por la RTS. Similarmente, una estación en las cercanías de la estación destino que recibe una trama CTS, retardará cualquier transmisión hasta que reciba la trama de reconocimiento. Si no se detecta el reconocimiento, entonces la estación puede usar el medio. En la figura 8, el nodo 1 tiene una trama que enviar al nodo 2, éste inicia el proceso enviando una trama RTS. El nodo destino responde al RTS con un CTS. Como los nodos 3 y 4 también reciben las tramas RTS/CTS, éstos retardarán el envío de cualquier trama. Una vez que se ha efectuado el

intercambio de RTS/CTS el nodo 1 puede transmitir sus tramas sin preocuparse de la interferencia que podrían causar los nodos ocultos.

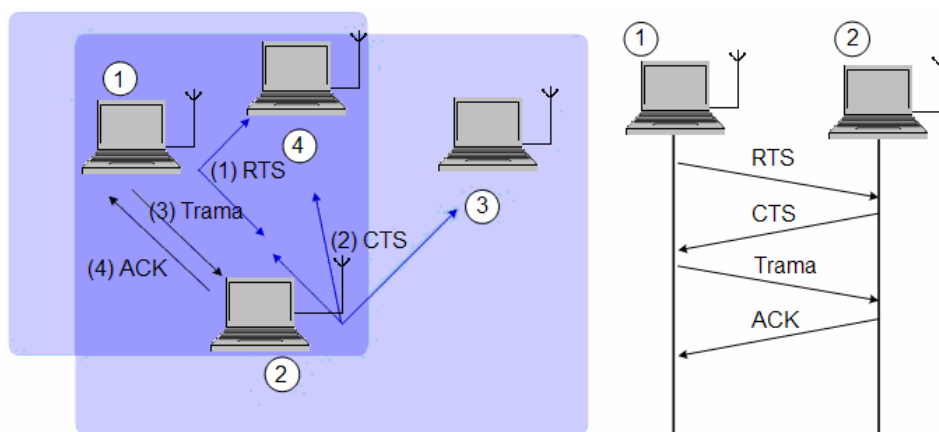


Figura 8 RTS/CTS.

Una falla del protocolo de intercambio de tramas en la estación fuente ocasionará una retransmisión. Esto es tratado como una colisión. Para prevenir que la capa MAC sea monopolizada intentando enviar una sola trama, existen contadores de reintentos y cronómetros para limitar el tiempo de vida de la trama. Cuando se llega a la cantidad límite de reintentos para una trama, ésta es descartada.

Debido a que el procedimiento RTS/CTS agrega bastante lastre (overhead) al protocolo, este es utilizado sólo en ambientes de alta capacidad y donde la contienda es significativa. Existe un tamaño mínimo para las tramas que se desean intercambiar utilizando el

procedimiento RTS/CTS, llamado umbral RTS, de tal manera que se justifique el costo del uso de estas tramas con el beneficio de la reducción del riesgo de colisión.

II.6.3. Formato general de la trama 802.11

En la figura 9 se muestra el formato de una trama 802.11. Este formato general se utiliza para todas las tramas de datos y de control, aunque no todos los campos se utilizan en todos los contextos. Los campos son los siguientes:

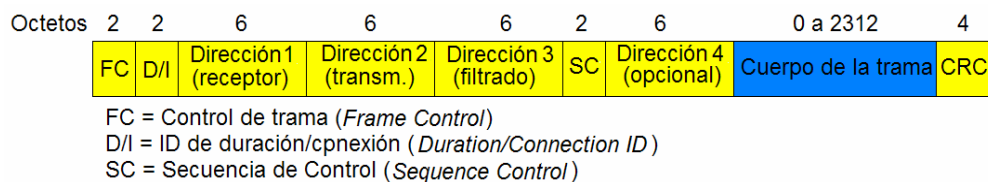


Figura 9 Formato de la trama MAC en IEEE 802.11.

- **Control de trama:** indica el tipo de trama (control, gestión o datos) y proporciona información de control. La información de control indica si la trama proviene o va destinada a un DS, y contiene información de control y relativa a la privacidad.
- **ID de duración/conexión:** si se utiliza como un campo de duración, indica el tiempo (en microsegundos) que el canal será reservado para una transmisión satisfactoria de una trama MAC. En algunas tramas de control, este campo contiene el identificador de una asociación o de una conexión.

- **Direcciones:** el número y significado de los campos de direcciones dependen del contexto. Los tipos de direcciones son la de la fuente, el destino, la estación transmisora y la estación receptora.
- **Control de secuencia:** contiene un subcampo de 4 bits (número de fragmento) utilizado para la fragmentación y el reensamblado, y un número de secuencia de 12 bits utilizado para numerar las tramas enviadas entre un transmisor dado y un receptor.
- **Cuerpo de la trama:** contiene una MSDU completa o un fragmento de la misma. La MSDU es una unidad de datos del protocolo LLC o información de control MAC.
- **Secuencia de comprobación de trama:** se trata de una comprobación de redundancia cíclica de 32 bits.

II.6.3.1. Tramas de control

Las tramas de control prestan servicio a la entrega fiable de tramas de datos. Existen seis subtipos de tramas de control:

- **Sondeo de ahorro de energía (PS-Poll, Power Save-Poll):** esta trama es enviada por cualquier estación hacia la estación que contiene el coordinador puntual (PC). Su objetivo es solicitar al PC que transmita una trama destinada a esta estación que ha sido

almacenada en una memoria temporal debido a que la estación se encontraba en modo de ahorro de energía.

- **Solicitud para enviar (RTS):** se trata de la primera trama en el protocolo de cuatro pasos RTS-CTS-Datos-ACK. La estación que envía este mensaje está alertando a un posible destino, así como al resto de las estaciones dentro del rango de recepción, de que pretende enviar una trama de datos a dicho destino.
- **Permiso para enviar (CTS):** Se trata de la segunda trama en el protocolo de cuatro pasos RTS-CTS-Datos-ACK. Es enviada por la estación de destino hacia la fuente para concederle permiso para emitir una trama de datos.
- **Confirmación:** proporciona una confirmación del destino hacia la fuente, indicando que los datos, información de gestión o sondeo de ahorro de energía previos han sido recibidos correctamente.
- **Fin de periodo libre de contención:** anuncia el final de un periodo libre de contenciones que forma parte de la función de coordinación puntual.
- **CF-End + CF-Ack:** confirmación de la trama CF-End. Esta trama finaliza el periodo libre de contención y libera a las estaciones de las restricciones asociadas con este periodo.

II.6.3.2. Tramas de datos

Existen ocho subtipos de tramas de datos, organizados en dos grupos. Los primeros cuatro subtipos definen tramas que transportan datos de una capa superior desde la estación origen hasta la estación de destino. Las cuatro tramas de transporte de datos son las siguientes:

- **Datos:** se trata de la trama de datos más simple. Puede ser utilizada tanto en el periodo de contención como en el periodo libre de contención.
- **Datos + CF-Ack:** únicamente puede ser enviada durante el periodo libre de contención. Además de transportar datos, esta trama confirma la recepción de otros previamente recibidos.
- **Datos + CF-Poll:** se utiliza por parte de un coordinador puntual para entregar datos a una estación móvil y para solicitar que ésta envíe una trama de datos que puede haber sido almacenada temporalmente.
- **Datos + CF-Ack + CF-Poll:** combina en una sola trama las funciones de las tramas Datos + CF-Ack y Datos + CF-Poll.

Los cuatro subtipos restantes de tramas de datos no transportan, en realidad, datos de usuario. La trama conocida como función nula (*Null Function*) no transporta datos, sondeos o confirmaciones. Se utiliza para transportar el bit de gestión de energía en el campo de

control de una trama destinada al PC, indicando así que la estación va a entrar en un estado de operación de baja energía. Las tres tramas restantes (CF-Ack, CF-Poll y CF-Ack + CF-Poll) poseen la misma funcionalidad que los subtipos de tramas de datos correspondientes que se han comentado en la lista anterior (Datos + CF-Ack, Datos + CF-Poll, Datos + CF-Ack + CF-Poll), pero sin transportar datos.

II.6.3.3. Tramas de gestión

Las tramas de gestión se utilizan para gestionar las comunicaciones entre las estaciones y los coordinadores puntuales. Las funciones que cubren incluyen la gestión de las asociaciones (solicitud, respuesta, reasociación, disociación y autenticación).

II.6.4. Trama de aviso (Beacon)

A excepción de las tramas de manejo de potencia, todas las tramas definidas en el estándar son necesarias para el funcionamiento de las WLANs 802.11, sin embargo la trama de aviso, que por familiaridad de aquí en adelante llamaremos Beacon, es de particular importancia y por eso se ha dedicado un apartado para explicar sus funciones más importantes y su formato.

La trama Beacon es utilizada en todas las redes 802.11, tanto en las de infraestructura como en las independientes. En las redes de infraestructura es responsabilidad del coordinador puntual transmitirla periódicamente, mientras que en las redes independientes las estaciones contienen para realizar su transmisión. La principal función de la trama Beacon es

anunciar la existencia de la red inalámbrica y los parámetros de operación de la misma para que las estaciones puedan decidir si se unen o no a la red. Una función muy importante es marcar el inicio de la operación de la PCF. En otro apartado se describe con mayor detalle esta función. Otra de las funciones del Beacon está relacionada con los mecanismos de ahorro de energía. En la figura 10 se muestra el formato de esta trama.

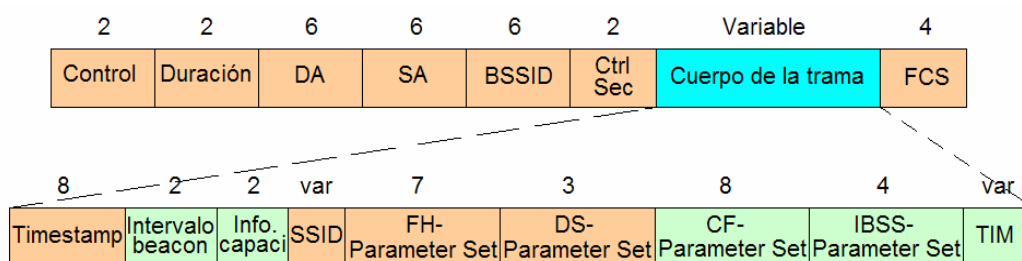


Figura 10 Formato de la trama Beacon.

La dirección destino (DA) del Beacon debe ser la dirección broadcast (FFFFFF), ya que la trama debe ser procesada por todas las estaciones. La dirección fuente (SA) y de filtrado (BSSID), deben corresponder con la del coordinador puntual, para que las estaciones solo procesen los Beacons del coordinador puntual al que se encuentran asociados.

El campo Timestamp es una estampa de tiempo puesta por el coordinador puntual y sirve para fines de sincronía. El campo Intervalo de Beacon, como su nombre lo indica, porta un número entero que es proporcional al periodo de repetición del Beacon. En el campo Información de Capacidad se especifica si la red de la que surgió el Beacon es una red

independiente o de infraestructura. En este último caso se indica también si el coordinador puntual es capaz de realizar la PCF. El campo SSID es un conjunto de caracteres codificados en ASCII para identificar a la red por un nombre familiar y no solamente por la dirección MAC del PC. Los campos que aparecen punteados son opcionales y algunos mutuamente excluyentes, en ellos se especifican por ejemplo las características físicas de la red, y los parámetros de la PCF, cuando se está usando. El campo TIM es utilizado por los mecanismos de ahorro de energía.

II.6.5. Espacios Intertramas (IF)

Los espacios intertrama son intervalos de tiempo en los que el canal debe permanecer ocioso o inactivo antes de que las estaciones ejecuten algún mecanismo de intercambio de tramas, y son necesarios para la operación de las funciones de coordinación. La relación entre ellos se muestra en la figura 11.

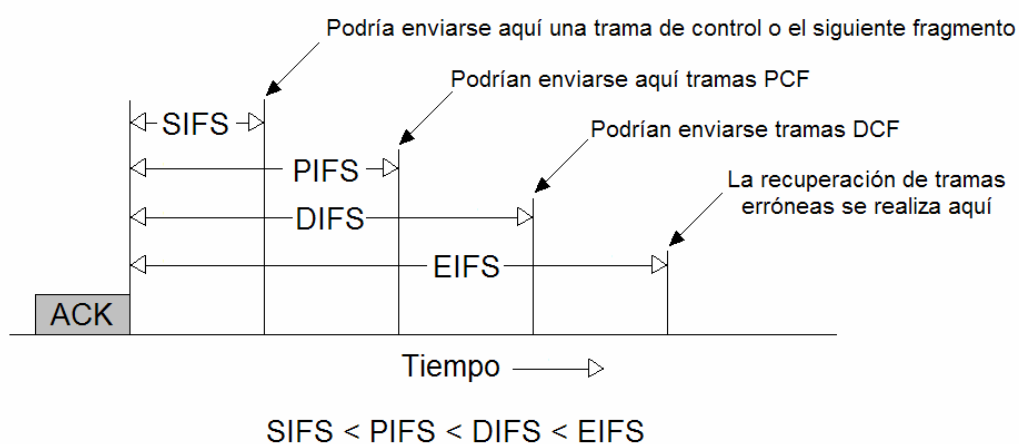


Figura 11 Espaciado entre tramas 802.11.

Se ha visto que como parte de la evasión de colisión en el MAC de 802.11, las estaciones retardan sus transmisiones hasta que el medio se encuentra desocupado. Variando la duración de los espacios intertrama se crean diferentes niveles de prioridad para los diferentes tipos de tráfico. La lógica detrás de esto es simple: el tráfico de alta prioridad tiene que esperar menos tiempo que el tráfico de baja prioridad. Así, si hay tráfico de alta prioridad esperando, éste toma el medio antes que las tramas de baja prioridad.

- **Espacio corto de intertrama (SIFS, *Short Interframe Space*).** El SIFS es utilizado para transmisiones atómicas, es decir, que deben darse de manera consecutiva sin tramas de otro tipo en medio. Por ejemplo las tramas RTS/CTS y los reconocimientos son tramas atómicas. Estas transmisiones de alta prioridad pueden iniciar una vez que el SIFS ha transcurrido. Una vez que estas transmisiones de alta prioridad han empezado, el medio se encuentra ocupado, entonces las tramas transmitidas después de que el SIFS ha transcurrido tienen prioridad sobre las tramas que pueden ser transmitidas sólo después de intervalos más largos.
- **Espacio de intertrama para PCF (PIFS, *PCF Interframe Space*).** El PIFS es utilizado por la PCF durante el periodo libre de contienda. Las estaciones con datos para transmitir durante el periodo libre de contienda pueden transmitir inmediatamente después de que el PIFS ha transcurrido a partir de la recepción de una trama de encuesta.

- **Espacio intertrama para DCF (DIFS, *DCF Interframe Space*).** El DIFS es el tiempo inactivo mínimo del medio para servicios basados en contienda. Las estaciones pueden tener acceso al medio sólo cuando éste ha estado desocupado por un periodo mayor que el DIFS.
- **Espacio extendido de intertrama (EIFS, *Extended Interframe Space*).** No es un intervalo de longitud fija. Es utilizado sólo cuando hay un error en la transmisión de una trama.

II.7. Mecanismos de acceso

II.7.1. Función de coordinación distribuida (DCF)

El mecanismo de acceso DCF esta basado en acceso múltiple por sensado de portadora con evasión de colisiones CSMA/CA. Los protocolos CSMA son bien conocidos, y su exponente más popular es Ethernet - CSMA/CD (es decir, con detección de colisiones).

Un protocolo CSMA funciona de la siguiente forma: Una estación A que desea transmitir debe primero sondear el medio. Si el medio está ocupado (es decir, otra estación B está transmitiendo) la estación A deberá postergar su transmisión. En caso contrario, puede transmitir.

Estos mecanismos son muy eficaces cuando el medio no está muy cargado, puesto que permiten transmitir con poco retardo. En ocasiones, dos o más estaciones determinarán

simultáneamente que el medio estará libre, y transmitirán a la vez (provocando una colisión).

Las colisiones deben detectarse, de forma que la capa MAC pueda reintentar la transmisión sin implicar a las capas superiores (lo que causaría un retardo significativo). En el caso de Ethernet, las propias estaciones transmisoras detectan las colisiones y esperan un tiempo variable hasta reintentar la transmisión (utilizando el algoritmo de retracción exponencial binario backoff).

Los algoritmos CSMA de detección de colisiones funcionan muy bien en las redes LAN cableadas, pero plantean problemas en las redes inalámbricas por dos razones principales:

1. La implementación de un algoritmo de detección de colisiones requeriría una conexión de radio full duplex, lo que encarecería el producto final.
2. En un entorno inalámbrico no se puede asegurar que una estación cualquiera escuche a todas las demás (asunción fundamental del esquema de detección de colisiones), por lo que la mera escucha del medio no asegura que esté libre.

Debido a que es extremadamente difícil para un dispositivo inalámbrico poder recibir y transmitir simultáneamente, el MAC del IEEE 802.11 usa prevención de colisión en lugar de la detección de colisión del IEEE 802.3. También es difícil que todos los dispositivos inalámbricos en una WLAN puedan escuchar a todos los demás dispositivos. Por esta

razón, el MAC del IEEE 802.11 implementa un vector de asignación de red (NAV). El NAV es un valor que indica a una estación la cantidad de tiempo que resta antes de que el medio esté disponible. El NAV se mantiene actual a través de los valores de duración que son transmitidos en todas las tramas. Examinando el NAV, una estación puede evitar transmitir incluso cuando el medio no parece ocupado por el sensado físico. El NAV es entonces, un mecanismo de sensado virtual. De esta forma, el MAC implementa una prevención de colisión, combinando el sensado virtual con el físico. La figura 12 muestra como el NAV protege de colisiones.

Cuando el MAC recibe una petición de las capas superiores para transmitir una trama, se realiza una verificación del medio con los mecanismos de sensado virtual y físico. Si ambos mecanismos indican que el medio no está en uso por un intervalo de tiempo DIFS (o EIFS si la trama recibida anteriormente contiene errores), el MAC puede iniciar la transmisión de la trama. Si cualquiera de los dos, el mecanismo de sensado virtual o el físico, indica que el medio está siendo ocupado durante un intervalo DIFS, el MAC seleccionará un intervalo de espera usando el algoritmo de backoff exponencial binario e incrementará un contador, llamado contador de reintentos.

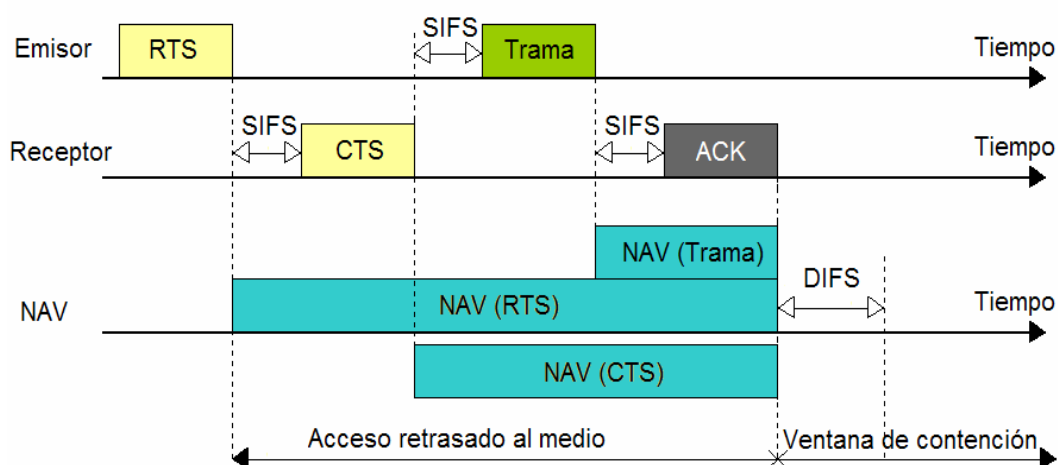


Figura 12 Uso del NAV para el sentido virtual.

El algoritmo backoff exponencial binario escoge un número aleatorio que representa la cantidad de tiempo que debe transcurrir antes de intentar una nueva transmisión. El número aleatorio resultante de este algoritmo está uniformemente distribuido en un intervalo, llamado ventana de contienda.

El MAC disminuirá el valor de la espera cada vez que el medio se detecte inactivo por ambos mecanismos de sentido por un intervalo de una ranura de tiempo. Una vez que el intervalo de espera ha expirado, el MAC inicia la transmisión. Si la transmisión no es exitosa (no se recibe el reconocimiento) se considera que ocurrió una colisión. En este caso la ventana de contienda se duplica y se selecciona un nuevo intervalo de espera. El proceso continuará hasta que la transmisión sea exitosa o hasta que la trama sea descartada por haber excedido el número de reintentos.

II.7.2. Función de coordinación puntual (PCF)

La función de coordinación puntual (PCF) es incluida en el estándar 802.11 para soportar aplicaciones que requieren servicios cercanos al tiempo real, es decir, tiene la intención de garantizar un ancho de banda a aquellas estaciones con tráfico sensible al retardo, proporcionándoles un acceso libre de contienda al medio inalámbrico.

La PCF sólo es soportada en redes de infraestructura, ya que todas las transmisiones son controladas por un coordinador puntual (PC) que, por los requisitos de procesamiento, memoria, ubicación y disponibilidad de energía que el PC requiere, debe residir en el coordinador puntual. Las estaciones asociadas pueden transmitir datos sólo cuando se les sea permitido por el PC. El intervalo de tiempo en el que opera la PCF es llamado periodo libre de contienda (CFP), y en el que opera la DCF es llamado periodo de contienda (CP). El servicio libre de contienda no está disponible todo el tiempo. Los periodos de servicio libre de contienda son alternados con el servicio estándar DCF, como se muestra en la figura 13.

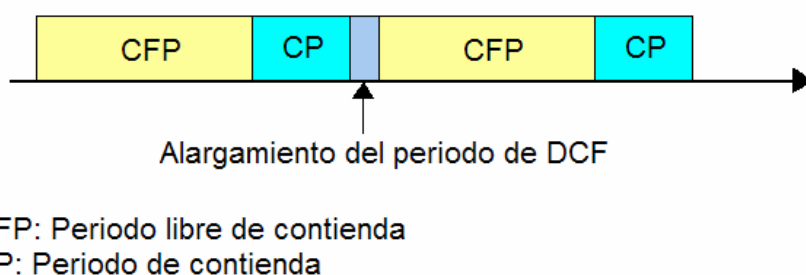


Figura 13 Periodo libre de contienda y periodo de contienda.

El periodo de contienda debe ser lo suficientemente largo para transmitir por lo menos una trama de tamaño máximo y su reconocimiento asociado. Los periodos de servicio libre de contienda y los basados en contienda son repetidos a intervalos regulares, los cuales son llamados intervalos de repetición libre de contienda. El PC es quien inicia el periodo libre de contienda, enviando una trama de aviso (*Beacon*). La figura 14 muestra una transferencia utilizando la PCF.

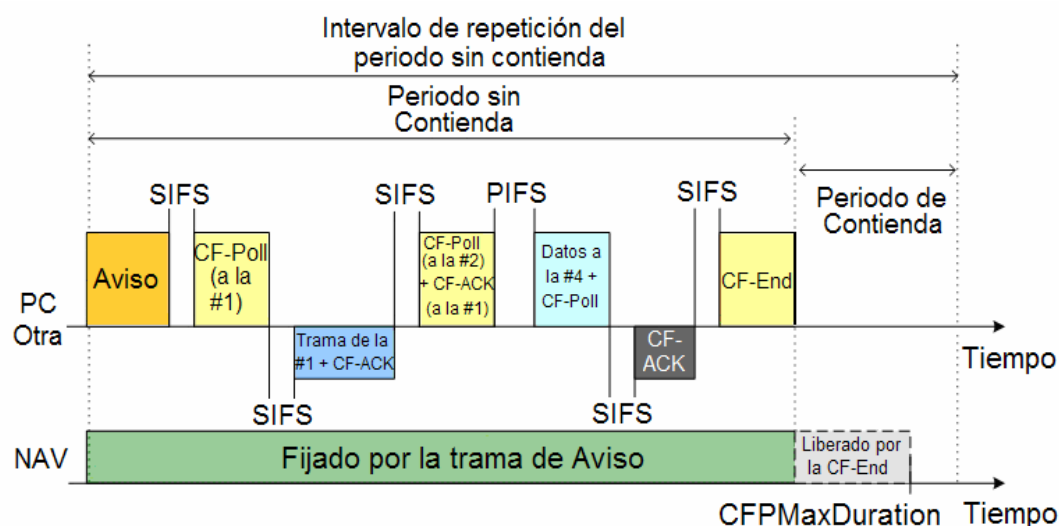


Figura 14 Utilizando el PCF.

Al principio del periodo libre de contienda, el PC transmite la trama de aviso. Un componente de esta trama es la máxima duración del periodo libre de contienda, *CFPMaxDuration*. Todas las estaciones que reciben el aviso fijan el NAV a la máxima duración para evitar el acceso de la DCF al medio inalámbrico.

Como seguridad adicional para prevenir interferencia, todas las transmisiones libres de contienda son separadas por un solo espacio de intertrama corto (SIFS) y el espacio intertrama del PCF (PIFS). Ambos son más cortos que el espacio de intertrama del DCF, por lo que las estaciones basadas en DCF no podrán ganar el acceso al medio durante este tiempo.

Para que las estaciones puedan transmitir durante el periodo libre de contienda deben de estar en la lista de encuesta. Esta lista contiene a las estaciones privilegiadas que solicitaron enviar tramas durante el periodo libre de contienda. Las estaciones entran en la lista de encuesta mediante un mensaje de solicitud de asociación enviado al PC. La petición de asociación incluye un campo que indica si la estación es capaz de responder a las encuestas durante el periodo libre de contienda.

Después de que el PC ha ganado el acceso al medio, éste encuesta a cualquier estación incluida en una lista de encuesta para transmisión de datos. Durante el periodo libre de contienda, las estaciones pueden transmitir sólo si el PC solicita la transmisión con una trama de encuesta (CF-Poll) la cual permite la transmisión de una sola trama. Para enviar varias tramas es necesario que el PC envíe varios CF-Poll.

III. REDES LOCALES INALÁMBRICAS 802.15.4

*Profesional no es el que obtiene un título, sino el
que sabe valorar a los demás por lo que son.*

--Anónimo

III.1. Introducción

Las principales características de las redes de sensores [802.15.4, 2003 y Mayné] son la flexibilidad de la red, bajo costo y bajo consumo de energía; este estándar se puede utilizar para múltiples aplicaciones domésticas e industriales, donde se requieran bajas tasas de transmisión de datos.

Una red inalámbrica típica de sensores puede contener cientos o miles de microsensors, los cuales están conectados por el medio inalámbrico. Estos microsensors son capaces de capturar varias propiedades físicas, como la temperatura, humedad, o presión y mapear las características físicas del ambiente para las medidas cuantitativas. Debido a su facilidad de despliegue, confiabilidad, escalabilidad, flexibilidad y auto-organización, las redes de sensores pueden ser desplegadas en casi cualquier ambiente, especialmente en aquellos en los cuales sistemas convencionales de sensores cableados son imposibles, no están disponibles o son inaccesibles, como un terreno inhabitable, campos de batalla, en el espacio, o en océanos profundos [Ilyas y Mahgoub, 2005; Jung y Vaidya, 2002 y Li *et al.*, 2005]. Por lo tanto las aplicaciones potenciales de las redes de sensores proyectan un espectro amplio en varios dominios como en:

- Control, comunicaciones, cómputo, inteligencia, vigilancia, reconocimiento y apuntamiento para propósitos militares
- Detección y monitoreo del ambiente
- Prevención de desastres
- Cuidado médico
- Automatización casera

- Exploración científica

Desde la perspectiva de arquitectura de red, las redes de sensores pueden ser clasificadas como pertenecientes a la familia de redes ad hoc inalámbricas, posiblemente móviles y con nodos auto configurables para formar una red sin ayuda de ninguna infraestructura arreglada. Los nodos en un sistema autónomo manejan el control necesario y las tareas de red en una manera distribuida. La arquitectura ad hoc supera las dificultades por la configuración predeterminada de la infraestructura de otras redes inalámbricas, así una red de sensores también puede ser aleatoria y rápidamente implementada y reconfigurada para aplicaciones específicas. Por otra parte, la arquitectura ad hoc es altamente robusta para fallas de nodo simple y puede proveer un nivel alto de tolerancia de errores debido a redundancias de nodos y de su naturaleza distribuida. Además la eficiencia de energía puede ser alcanzada a través de un enrutamiento de comunicación multisalto. Un reuso del ancho de banda puede también ser benéfico para dividir el salto grande a múltiples saltos cortos, logrando que cada salto tenga una distancia corta considerable.

Aunado a lo anterior, el ciclo de trabajo de las redes de sensores es bastante bajo (posiblemente tan bajo como 1%) y los usuarios finales generalmente se enfocan en la información recolectada en el sumidero, esto debido a que generalmente el flujo de datos es unidireccional, por ejemplo, de los sensores hacia un centro de procesamiento común. Como resultado, muchas arquitecturas existentes y protocolos para otras redes inalámbricas no son convenientes para las redes de sensores, debiendo considerar en el diseño de estas,

el tiempo de vida, el rendimiento del procesamiento y las características de retardo. Por lo tanto se deberán implementar los recursos eficientemente, con escalabilidad y confiabilidad para satisfacer los requerimientos específicos de las redes de sensores.

III.2. Características únicas de las redes inalámbricas de sensores

Las redes de sensores consisten de un gran número de nodos distribuidos que se organizan ellos mismos para formar una red inalámbrica de multisaltos [Poon y Li, 2003; Woo y Culler, 2001 y Ye *et al.*, 2002]. Cada nodo consiste de uno o más tipos de sensores, un microprocesador incrustado, poca memoria y radio de transmisión/recepción de baja energía. Generalmente esos nodos son accionados por baterías y coordinados entre ellos mismos para lograr una tarea común. Los nodos son extremadamente chicos en tamaño y posee recursos limitados de energía. La transmisión de energía y el rango de comunicación son muy bajos, lo cual es compensado por una alta densidad de nodos en la mayoría de los casos. Las redes de sensores pueden tener diferentes arquitecturas como por ejemplo: distribuidas, jerárquicas, o en agrupamientos, como lo muestra la figura 15 [Ilyas y Mahgoub, 2005].

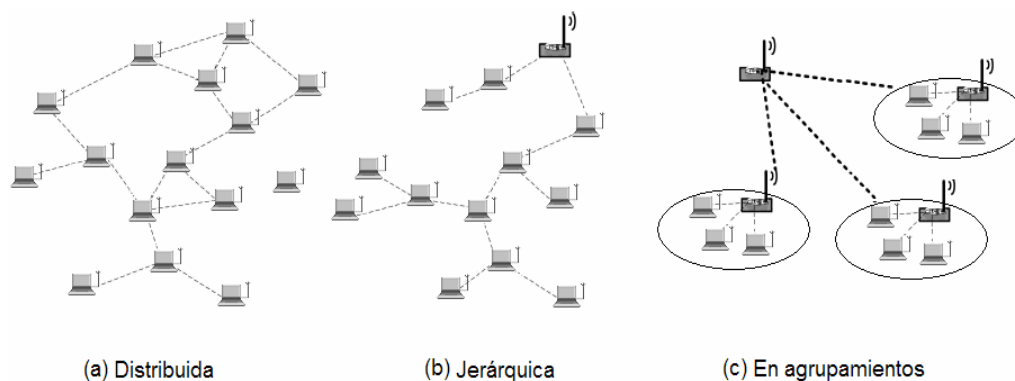


Figura 15 Arquitectura de las redes de sensores.

III.3. ¿Por qué es importante el diseño de la capa mac?

En todas las redes de sensores, los nodos deben compartir un único medio para la comunicación. El gran desempeño de la red depende por encima de que tan eficiente y claramente los nodos pueden compartir este medio en común. Se debe notar que la transmisión de paquetes es directamente manejado por la capa MAC. Comparado con un medio alámbrico, una significativa porción de la energía del nodo es gastada en la transmisión de radio y en la escucha del medio para la recepción anticipada del paquete. Por otra parte, las redes inalámbricas siempre tienen restricciones en la energía fuente; así, el diseño cuidadoso del esquema MAC es necesario para el óptimo desempeño y extender el tiempo de vida de la red.

En el contexto de redes de sensores, este requerimiento es extremadamente crítico. De acuerdo a las altamente marcadas características anteriores, los nodos de una red de

sensores transportan bajos recursos de energía y permanecen sin vigilancia después de acomodarlos; por lo tanto, el tiempo de vida del nodo depende completamente de cómo la energía es conservada durante la comunicación.

Otro tema relacionado es la alta densidad de nodos en las redes de sensores. Aunque los rangos de transmisión son bajos, un alto número de nodos pueden contender por el medio, al menos en ciertas partes de la red. Así, en las redes de sensores se tiene que ser cuidadoso en el diseño del esquema MAC para lograr el óptimo desempeño hacia la aplicación deseada.

III.4. Esquemas MAC más utilizados

Actualmente los protocolos MAC mas utilizados son de 2 principales tipos: basada en contención como por ejemplo CSMA (acceso múltiple por sensado de portadora) en donde cada nodo esta sensando el medio buscando un canal libre para poder transmitir, y basados en calendarización como por ejemplo TDMA (acceso múltiple por división de tiempo), FDMA (acceso múltiple por división de frecuencia), o CDMA (acceso múltiple por división de código) en donde los nodos son asignados a canales subdivididos [Poon y Li, 2003; Singh y Raghavendra, 1998 y Woo y Culler, 2001].

III.5. Necesidad de la eficiencia del recurso

Un nodo típico es compacto, delgado y barato, pero integra las funcionalidades de sensibilidad, procesamiento de datos y cómputo, y comunicación. Es normalmente operado

por una fuente de poder unida, que es usualmente una batería no recargable o no reemplazable.

El tamaño físico limitado de las redes de sensores tiene un problema inherente severo de limitación de recursos [Ilyas y Mahgoub, 2005]. Por lo tanto, en las redes de sensores, la eficiencia del recurso es extremadamente crítico a pesar de su complejidad. Sobre todo, los protocolos de eficiencia de energía tienen la presión de extender el tiempo de vida del sistema, esto debido a que las redes de sensores normalmente operan solas, esto es, no están físicamente supervisadas por una persona, por ejemplo, si se le acabara la batería a algún sensor no sería posible cambiárselo. En resumen, se tienen que hacer esfuerzos para incrementar la eficiencia en la utilización de los otros recursos. Por ejemplo, usar algoritmos con baja complejidad logrando con esto reducir el tiempo de cómputo y así ahorrar energía.

Debería ser notado que es difícil definir el tiempo de vida del sistema para todos los escenarios posibles de aplicación. Por un lado el tiempo de vida de un sistema puede ser medido por el tiempo cuando el primer sensor se terminó su energía, o un sistema puede ser declarado muerto cuando cierta fracción de sensores muere. Usar una definición u otra depende de la aplicación en particular. Por otro lado, el tiempo de vida del sistema puede ser también medido por parámetros específicos a la aplicación, como son el tiempo en el que el sistema ya no puede proveer mas resultados aceptables.

III.6. Calidad de servicio considerando eficiencia de energía

La calidad de servicio (QoS) de las redes de sensores puede ser evaluada por las siguientes medidas [Younis y Nadeem; Poon y Li, 2003 y Singh y Raghavendra, 1998]:

- *Eficiencia de energía.* Esto determina el tiempo de vida del sistema y es un tema crucial en las redes de sensores. Esta claro que para la misma tarea de sensado, con mayor eficiencia de energía, el sistema vivirá más tiempo.
- *Confiabilidad.* Esto refleja el valor básico de la información recopilada porque la cantidad de datos recibidos determina el nivel de confiabilidad. En general, entre más datos son recibidos, la exactitud deberá de ser mayor.
- *Retardo.* En la mayoría de los casos, la información recopilada del monitoreo del ambiente es tiempo crítico, por eso deberá ser entregado a tiempo.
- *Seguridad.* Porque muchas redes de sensores son usadas para propósitos militares o de vigilancia. Por lo tanto, la privacidad de los datos y comunicación segura son de suma importancia.
- *Error en la tolerancia:* Aunque los canales inalámbricos de comunicación son usualmente ruidosos, propensos a errores, y de tiempo variante, los datos deben ser entregados confiablemente. En esos casos, la verificación y corrección de datos en cada

capa de la red es crítico, para proveer resultados exactos. Por otra parte, algunas redes de sensores pueden fallar debido a la terminación de energía u obstáculos físicos en el ambiente, así se espera que las redes de sensores realicen una auto examinación, auto calibración, auto reparación y auto recuperación de procedimientos.

- *Escalabilidad y Flexibilidad:* El sistema debe de ser escalable y flexible para la ampliación de la escala de redes. Los acercamientos a la escalabilidad y flexibilidad incluyen agrupamientos, entrega de multisaltos, localización y procesamiento de datos.

Sin embargo, es imposible el alcance de todos estos objetivos al mismo tiempo porque algunos de ellos entran en conflicto entre ellos mismos. En términos de consumo de recursos, es necesario hacer una compensación entre la eficiencia de energía y otras medidas. Por ejemplo, una alta exactitud requiere de la entrega de grandes cantidades de datos, lo cual lleva a mayor consumo de energía y ancho de banda. Similarmente, si se decidiera tener entregas a tiempo, seguridad y confiabilidad, se aumentaría el consumo de energía. El cómputo local es de ayuda para eliminar la cantidad de datos transmitidos, pero un cómputo complejo y uso de memoria puede causar un mayor retardo, logrando con esto incrementar el consumo de energía.

III.7. Consumo de energía en las redes de sensores

Como dispositivos micro electrónicos, la tarea principal de las redes de sensores es detectar fenómenos, realizar procesamiento de datos localmente y transmitir o recibir datos. Una red

de sensores típica es generalmente compuesta de cuatro componentes: una fuente de alimentación, una unidad de sensado, una unidad de cómputo/procesamiento y una unidad de comunicación. Excepto por la unidad de alimentación, todos los otros componentes consumirán energía al realizar sus tareas. La mayor energía consumida es en el cómputo y en la comunicación [Ilyas y Mahgoub, 2005].

III.8. Protocolos MAC eficientes en energía

La función de la capa de enlace de datos incluye el enmarcado y el acceso al enlace, entrega confiable, control de flujo, detección de error, y retransmisión. Porque los sensores comparten un medio inalámbrico común para la comunicación, los protocolos de la subcapa MAC son críticos para proporcionar coordinación entre sensores. Esos protocolos intentan proveer comunicación confiable y logran un alto caudal eficaz con retardos definidos, el cual al mismo tiempo reduce colisiones y disipa energía.

Fuentes del consumo de energía en la capa MAC

Existen cuatro principales fuentes donde se puede ahorrar mayor energía en la capa MAC [Younis y Nadeem; Poon y Li, 2003 y Singh y Raghavendra, 1998]:

- *Retransmisión debido a la colisión o congestión.* En las redes de sensores, todos los sensores son capaces de transmitir datos a través de mismo canal de difusión. Como un dispositivo de comunicación limitada, cada sensor puede tener solo una antena receptora; por lo tanto, si 2 o mas transmisiones de múltiples fuentes arriban al mismo tiempo, una

colisión podría pasar, y ninguno de los paquetes transmitidos podrían ser recibidos correctamente. Para garantizar una transmisión confiable, después de que sensores fuente detectan datos colisionados, ellos deben retransmitir, lo cual causa gasto extra de energía. Por otro lado, debido al límite en la capacidad de los canales inalámbricos los datos perdidos toman lugar cuando el tráfico es pesado y la red se encuentra congestionada. En este caso también se requiere de retransmisiones.

- *Sensado del canal inactivo.* En orden para eliminar o reducir las colisiones, los sensores deberían sensar el canal continuamente para obtener información del horario o esperar antes de enviar datos hasta que el canal sea detectado desocupado. En ambos casos, la energía extra en el sensado es necesitada. Actualmente, en redes ad hoc, el sensado de energía en canales inactivos no es importante comparado con la recepción o transmisión de datos.
- *Oír sin querer.* Cuando se comparte un medio común inalámbrico, la transmisión de datos por un sensor puede alcanzar todos los otros sensores dentro de su rango de transmisión. Un sensor entonces puede recibir paquetes que no son destinados a él. Esto es llamado oír sin querer, y también desperdicia energía.
- *Cabeceras debido al control en los mensajes.* La mayoría de los protocolos MAC operan por cambios de mensajes de control para señalización, calendarización, y evitar colisiones, lo cual consumirá energía extra.

Por lo tanto, en el orden para el diseño de un protocolo MAC eficiente en energía, las colisiones deberían ser evitadas lo más posible. Además, la disipación de energía debido al sensado en un canal desocupado, oír sin querer, y la cabecera deberían también ser reducidas a lo mínimo posible. Muchas aproximaciones han sido propuestas, pero es difícil lograr el objetivo de la conservación total de energía al mismo tiempo.

III.9. Clasificación y comparación del protocolo MAC

En general, las comunicaciones inalámbricas tienen una variedad de protocolos MAC, los cuales pueden ser clasificados dentro de distintos grupos de acuerdo a diferentes criterios. Basados en si un control central esta involucrado en la coordinación, el protocolo MAC de las redes de sensores puede ser clasificado como centralizado, distribuido (descentralizado), e híbrido. Actualmente, el protocolo híbrido intenta combinar las ventajas de los esquemas de centralización y distribución, pero puede ser mas complejo. La figura 16 [Ilyas y Mahgoub, 2005] muestra tal clasificación.

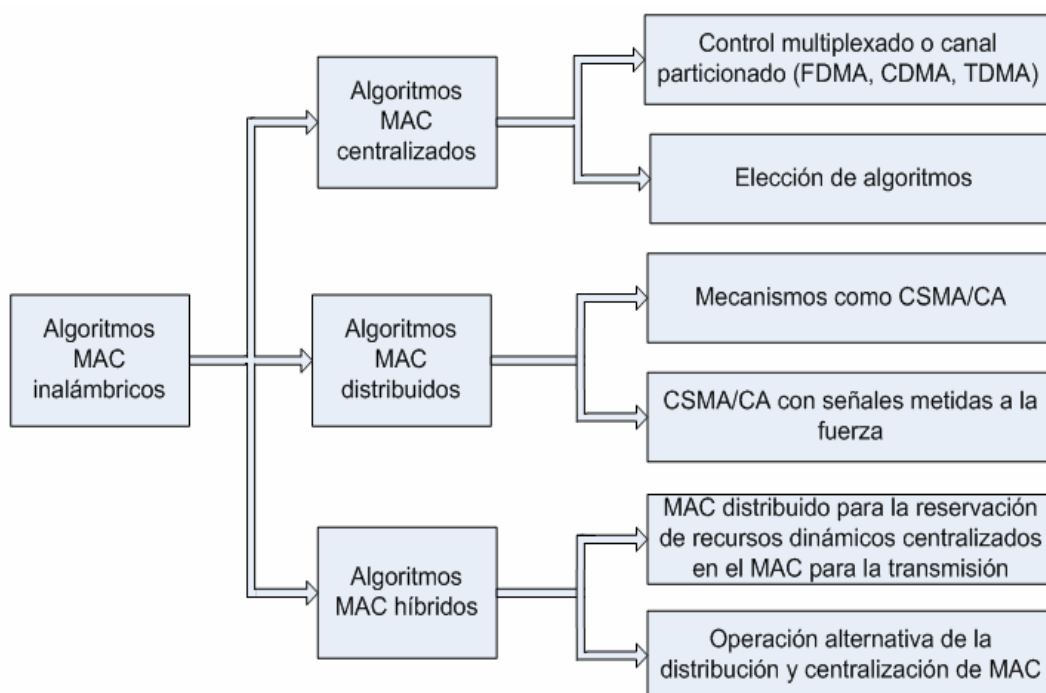


Figura 16 Clasificación de los protocolos inalámbricos MAC.

III.9.1. Protocolo MAC centralizado

El protocolo MAC centralizado incluye algoritmos de encuesta y algoritmos de multiplexación controlada (o división de canales). Un control centralizado es necesitado para coordinar el acceso al canal entre los diferentes sensores y poder lograr la operación libre de colisiones. Así, el desperdicio de energía debido a las colisiones puede ser eliminada. Sin embargo, debido a las altas cabeceras y al gran retardo, los mecanismos de encuesta puros no son adecuados en gran escala en las redes de sensores. Dependiendo de cuanto ancho de banda sea asignado, los mecanismos de control de multiplexado pueden ser: acceso múltiple por división de frecuencia (FDMA), acceso múltiple por división de

código (CDMA), o acceso múltiple por división de tiempo (TDMA) [Younis y Nadeem]. Esta clase de protocolo es preferible en redes de sensores, no solo porque es libre de colisiones, sino también porque los nodos pueden ser apagados en ranuras no asignadas (disponibles), y así ahorrar costosa energía debido al sensado inactivo y al oír sin querer.

Sin embargo, la desventaja existe en el esquema de la división de canal. Cuando se usa TDMA, el controlador central podría consumir más energía que otros sensores, y los horarios tienden a ser dinámicos, lo cual conducirá a mecanismos más complejos. Además, también requiere sincronización de reloj entre todos los sensores, lo cual también disipará alguna energía extra. Para FDMA, debido al limitado ancho de banda en el sistema, no es realista asignar una frecuencia única para cada sensor individualmente. Además, el ancho de banda desperdiciado ocurrirá debido al bajo ciclo de trabajo. Similarmente, cuando se usa CDMA, aunque todos los nodos pueden transmitir, algunas cabeceras resultaran porque cada nodo debe codificar sus bits de datos con su código único asignado.

III.9.2. Protocolo MAC distribuido

El protocolo MAC distribuido usualmente provee acceso múltiple aleatorio al medio inalámbrico. La mayoría de los protocolos MAC predominantes en esta categoría adaptan el sensado de portadora y la evasión de colisiones, es decir, basados en CSMA/CA. A través del sensado de portadora, significantes colisiones de transmisiones pueden ser eliminadas por el aplazamiento de la transmisión cuando el canal es detectado ocupado. Para fomentar la disminución de la probabilidad de colisión, algunas medidas pueden ser

tomadas en la evasión de colisiones, tal como un procedimiento aleatorio de back off; un ejemplo representativo de CSMA/CA basado en el protocolo MAC es especificado en IEEE 802.11, la función de coordinación distribuida (DCF).

Sin embargo, en algunos casos, la ubicación dependiente del sensado de portadora resulta en problemas de nodo oculto (explicado en el capítulo 2), la cual tiene un gran impacto en la eficiencia.

Usando el protocolo MAC distribuido, los nodos operan en una forma descentralizada, así éste es fácil de implementar y desempeñar más mecanismos de control, flexibles y escalables, lo cual podría acomodarse bien con los requerimientos de las redes de sensores. Sin embargo, no hay protocolos libres de colisión, y el esquema llamado escuchar antes de hablar resulta en un alto desperdicio de energía debido a las colisiones, oír inactivamente, oír sin querer, y cabeceras de mensajes de control. En [Ye *et al.*, 2002] un protocolo MAC nuevo llamado sensor-MAC (S-MAC) es propuesto e intenta reducir todos los cuatro tipos de desperdicio de energía.

III.9.3. Protocolo MAC híbrido

Las capas de protocolos MAC centralizada y distribuida no pueden suministrar resultados óptimos en términos de eficiencia de energía en redes de sensores. El protocolo MAC híbrido intenta integrar la controlabilidad del protocolo centralizado con la flexibilidad del protocolo distribuido.

III.10. Estándar para redes inalámbricas del tipo 802.15.4

En el año 2000 dos grupos especialistas en estándares (ZigBee y el grupo de trabajo IEEE 802) se unieron para dar a conocer la necesidad de un nuevo estándar para redes inalámbricas de bajo consumo y de bajo costo para aplicaciones domésticas e industriales. Dando como resultado un nuevo estándar para áreas personales (LR-WPAN, *Low Range Wireless Personal Area Network*) que ahora se conoce como el 802.15.4. Algunas propiedades de 802.15.4 se resumen en la tabla II.

III.10.1. Capa de red

En las redes tradicionales por cable, la capa de red es responsable por la topología de construcción y mantenimiento de la misma, así como de nombrarla y de los servicios de enlace que incorporan las tareas necesarias de direccionamiento y seguridad. Las redes que se construyan dentro de esta capa del estándar IEEE 802.15.4, se esperan que se auto organicen y se auto mantengan en funcionamiento con lo que se pretende reducir los costos totales para el consumidor.

El estándar IEEE 802.15.4 soporta múltiples topologías para su conexión en red, entre ellas la topología tipo estrella y la topología par a par, dichas topologías se muestran en la figura 17 [Mayné] [802.15.4, 2003]. La topología a escoger es una elección de diseño y va a estar dada por la aplicación a la que se desee orientar; algunas aplicaciones como periféricos e interfases de computadoras, requieren de conexiones de baja potencia de tipo estrella, mientras que otras como los perímetros de seguridad requieren de una mayor área de cobertura por lo que es necesario implementar una red par a par.

Tabla II Propiedades de IEEE 802.15.4

| | |
|---|--|
| Bandas de frecuencia y rangos de transmisión de datos | 868 MHz: 20 Kb/s; 915 MHz: 40 Kb/s; 2.4 GHz: 250 Kb/s. |
| Alcance | 10 - 20 m |
| Retardo | Por debajo de 15 ms |
| Canales | 868/915 MHz: 11 canales 2.4 GHz: 16 canales |
| Modo de direccionamiento | Todos los chips tienen 64 bits IEEE de direccionamiento |
| Canal de acceso | CSMA/CA |
| Seguridad | 128 AES [Daemen y Rijmen, 1999] |
| Red | Hasta 2^{64} dispositivos |
| Rango de temperatura | -40° a +85° C |

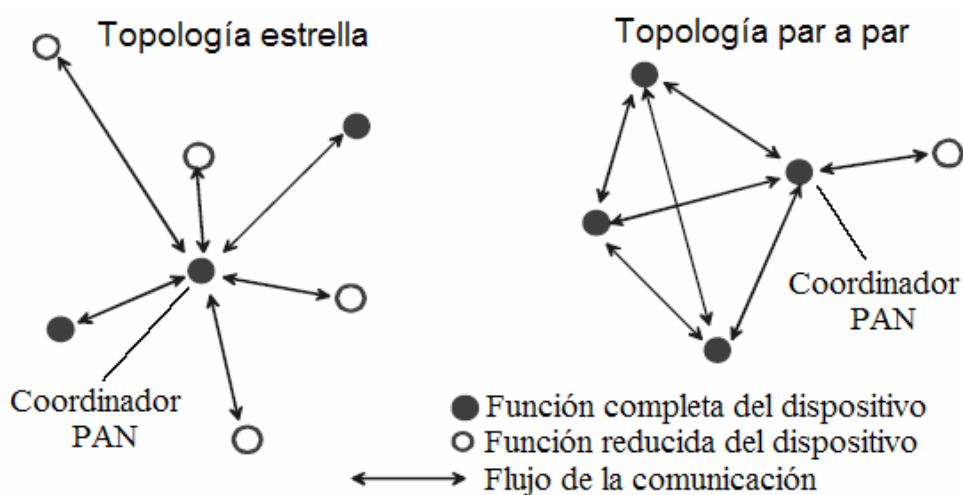


Figura 17 Ejemplos de topología, red tipo estrella y par a par.

La red puede tener un Coordinador de red (PAN) y múltiples RFDs/FFDs.

Función completa del dispositivo (FFD Full Function Device por sus siglas en inglés). Es un dispositivo de función completa y se puede usar en cualquier topología. Tiene la capacidad de poder ser Coordinador de red y puede hablar con cualquier dispositivo.

Función reducida del dispositivo (RFD Reduced Function Device por sus siglas en inglés). Es un dispositivo de función reducida y se encuentra limitado a una topología en estrella. No puede ser un Coordinador de red y solo puede hablar con un Coordinador de red, además es muy fácil de implementar.

III.10.2. Capa de enlace de datos

IEEE 802 divide a la capa de enlace de datos (DLL) en dos subcapas, la subcapa de control de acceso al medio (MAC) y la subcapa de control de enlace lógico (LLC). El LLC es común a todos los estándares 802, mientras que la subcapa MAC depende del hardware y varía respecto a su implementación física. La figura 18 muestra la forma en que el estándar IEEE 802.15.4 se basa en la organización internacional para la estandarización (ISO) del modelo de referencia para la interconexión de sistemas abiertos (OSI).

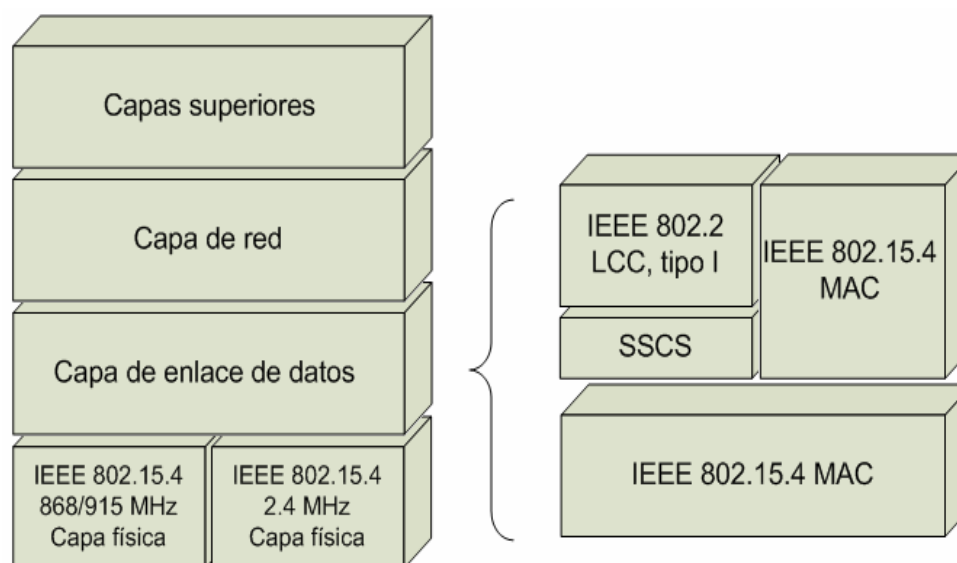


Figura 18 Relación de IEEE 802.15.4 con el sistema OSI.

Las características del MAC IEEE 802.15.4 son: asociación/disociación, reconocimientos de entrega de trama (ACK), mecanismos de acceso al canal, validación de trama, control de garantía de ranuras de tiempo (Slot Time), control de guías (Beacon) y barrido de canal. Las subcapas MAC proporcionan dos tipos de servicios hacia las capas superiores que se acceden a través de dos Puntos de Acceso a Servicios (SAPs). A los servicios de datos MAC se acceden por medio de la parte común de la subcapa (MCPS-SAP), y al manejo de servicios MAC se accede por medio de la capa MAC de manejo de identidades (MLME-SAP). Esos dos servicios proporcionan una interfaz entre las subcapas de convergencia de servicios específicos (SSCS) u otro LLC y las capas físicas.

Se caracteriza por una baja complejidad, el MAC 802.15.4 es muy simple, haciéndolo muy versátil para las aplicaciones hacia las que fue orientado, aunque se paga el costo de tener un instrumento con características menores a las del 802.15.1 (por ejemplo el 802.15.4 no soporta enlaces sincronizados de voz). El mecanismo ACK es usado para la retransmisión automática por la capa MAC sobre la pérdida de paquetes y la protección de transmisión efectiva salto por salto.

III.10.2.1. Estructura de las tramas MAC

El formato general de las tramas MAC se diseñó para ser muy flexible y que se ajustara a las necesidades de las diferentes aplicaciones con diversas topologías de red, al mismo tiempo que se mantenía un protocolo simple [Mayné; 802.15.4, 2003].

- *Marco de datos (Data Frame)*. Usado para todas las transferencias de datos.
- *Marco de reconocimiento (Acknowledgment Frame)*. Usado para confirmar la recepción exitosa de la trama.
- *Marco de comando MAC (MAC Command Frame)*. Usado para manejar todo el control de entidad MAC.
- *Marco Beacon (Beacon Frame)*. Usado por un coordinador para transmitir Beacons.

Estructura de la trama de datos (Data Frame)

La trama general del MAC se le denomina PPDU (*Phy Protocol Data Unit*), Capa Física de la Unidad de Datos del Protocolo MAC. La trama empieza con un encabezado de sincronización (SHR, *Synchronization Header*), seguido de un encabezado de capa física para indicar la longitud del paquete (PHR, *Phy Header*), y finalizando con la capa física de la unidad de servicios de datos (PSDU, *Phy Service Data Unit*). La figura 19 muestra el formato general de la trama MAC.

El preámbulo, de 32 bits, está diseñado para la adquisición de símbolos y para los tiempos de chip, y en algunos casos se utiliza para ajustes bruscos en la frecuencia. No se requiere una ecualización en el canal de la capa física debido a la combinación de pequeñas áreas de cobertura con rangos de transmisión bajos.

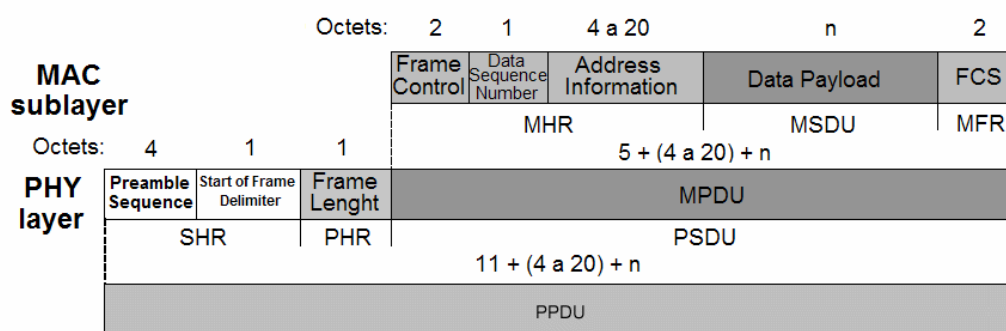


Figura 19 Formato general de la trama MAC.

Dentro del encabezado de la capa física, se utilizan 7 bits para especificar la longitud de la carga de datos (en bytes). La longitud de paquetes va de 0 a 127 bytes. La duración máxima de paquetes es de 4.25 ms para la banda de 2.4 GHz, y de 26.6 ms para la banda de 915 MHz, y de 53.2 ms para la banda de 868 MHz.

La trama de Unidad de Datos del Protocolo MAC (MPDU, *MAC Protocol Data Unit*), se compone del encabezado MAC (MHR, *MAC Header*), Unidad de Servicios de Datos MAC (MSDU, *MAC Service Data Unit*) y termina con el chequeo de la trama (MFR, *Mac Footer*). El primer campo de la trama de encabezado MHR es el campo de control, denominado Frame Control.

Frame Control, indica el tipo de trama MAC que se pretende transmitir, especifica el formato, el campo de dirección y controla los mensajes de enterado (ACK). En pocas palabras, la trama de control (*Frame Control*) especifica como es el resto de la trama de datos y que es lo que contiene.

Data Sequence Number, verifica la integridad de la trama MAC. Es una secuencia de números, al igual que tramas FCS. La secuencia de números en los encabezados enlaza a las tramas de enterado con transmisiones anteriores. Una transmisión se considera exitosa solo cuando la trama de enterado (ACK) contiene la misma secuencia de números que la secuencia anterior transmitida. Las tramas FCS ayudan a verificar la integridad de las tramas del MAC.

Address information, el tamaño de las direcciones puede variar entre 0 y 20 bytes. Por ejemplo, una trama de datos puede contener información de la fuente y del destinatario, mientras que la trama de enterado (ACK) no contiene ninguna información de ninguna dirección. Por otro lado una trama de guía solo tiene información de la dirección de la fuente. Esta flexibilidad en la estructura ayuda a incrementar la eficiencia del protocolo al mantener los paquetes lo más reducido posible.

Payload, es de longitud variable; sin embargo, la trama completa de MAC no debe de exceder los 127 bytes de información. Los datos que lleva el Payload dependen del tipo de trama. El estándar IEEE 802.15.4 tiene cuatro diferentes tipos de tramas MAC: trama de guía, trama de datos, trama de enterado (ACK) y trama de comandos. Solo las tramas de datos y de guía contienen información que proviene de capas superiores; las tramas de mensajes ACK y la de comandos MAC originados en el MAC son usadas para las comunicaciones MAC par a par.

FCS (Frame Check Sequency), es una trama de chequeo de 16 bits CRC (*Cyclic Redundancy Chech*).

Estructura de la trama ACK (Acknowledgment Frame)

La trama ACK proporciona el intercambio de información activa desde el receptor al emisor de que el paquete fue recibido sin error. Este corto paquete aprovecha el tiempo de silencio (*quiet time*), especificado por la norma, inmediatamente después de la transmisión

del paquete de datos [Mayné; 802.15.4, 2003]. La figura 20 muestra la vista esquemática de la trama de enterado (ACK).

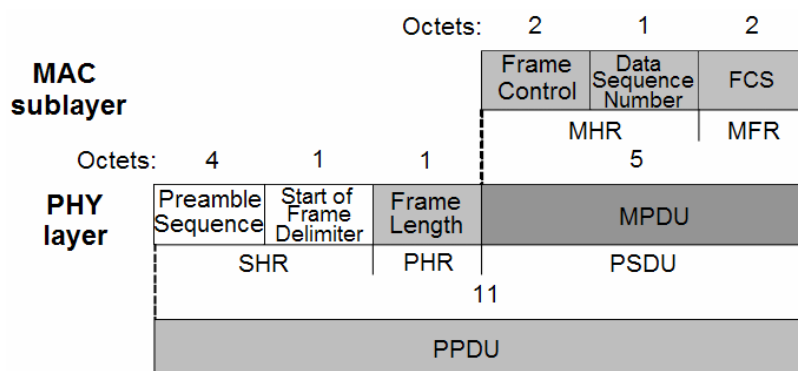


Figura 20 Vista esquemática de la trama de enterado (ACK).

Estructura de la trama de comandos MAC (MAC Command Frame)

La trama de Comandos MAC es un mecanismo para el control o configuración a distancia de los dispositivos de los nodos. Permite que un director de la red centralizado, pueda configurar a los dispositivos individualmente sin importar lo grande que sea la red. La figura 21 muestra la vista esquemática de la estructura de la trama de Comandos MAC.

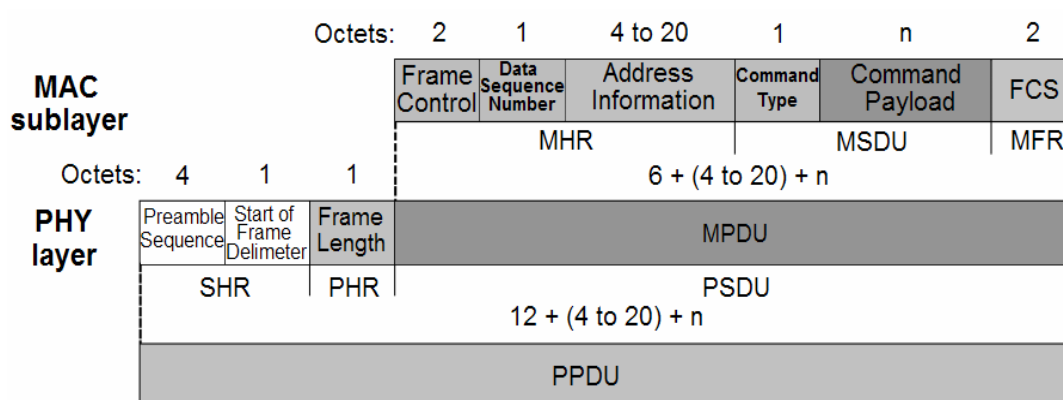


Figura 21 Vista esquemática de la estructura de la trama de comandos MAC.

En la estructura se puede ver que solo se añade el campo “Command Type” a la estructura de la trama de Datos.

Estructura de la trama Beacon (Beacon Frame)

La trama Beacon añade un nuevo nivel de funcionalidad de la Red. Los dispositivos de los nodos pueden despertarse solamente cuando es transmitida una señal de guía o Beacon, escuchar su dirección y si no la escuchan volver al estado dormido, con el consecuente ahorro de energía. Las tramas Beacon son importantes en las redes de malla y de agrupamiento para mantener todos los nodos sincronizados sin requerir que los nodos consuman energía de la pila, escuchando durante periodos largos de tiempo. La figura 22 muestra la vista esquemática de la trama Beacon.

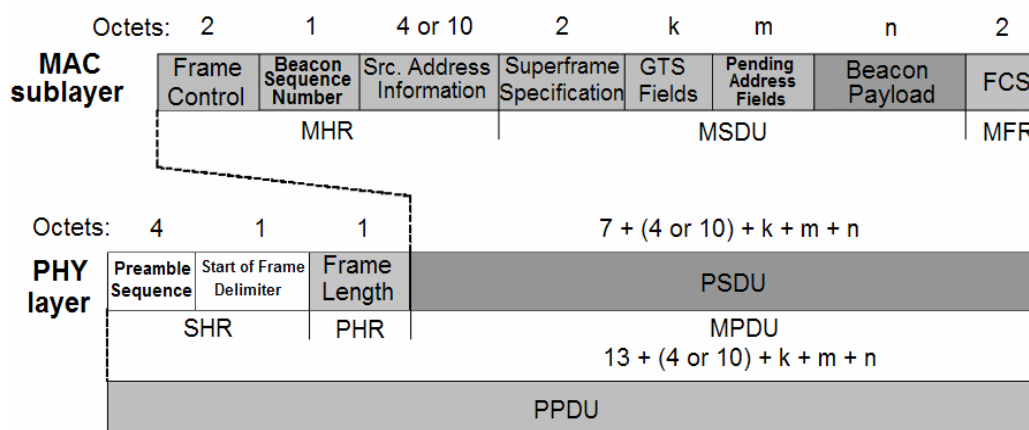


Figura 22 Vista esquemática de la trama Beacon.

Esta estructura de la trama Beacon contiene las denominadas Supertramas. Algunas aplicaciones requieren anchos de banda dedicados para lograr grandes estados latentes, para un muy bajo consumo de energía. Para lograr dichos estados latentes el IEEE 802.15.4 puede operar este modo opcional, llamado Supertramas. La figura 23 muestra la estructura de las supertramas.

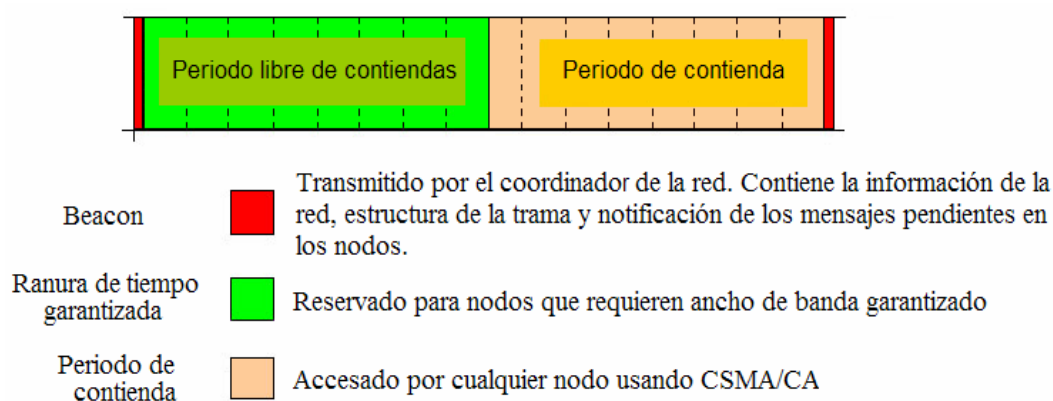


Figura 23 Estructura de las supertramas.

En una supertrama, un coordinador de red, denominado coordinador PAN, transmite supertramas de guía (Beacon) en intervalos definidos. Estos intervalos pueden ser tan cortos como 15 ms o tan largos como 245 s. El tiempo entre cada uno de ellos se divide en 16 ranuras de tiempo, independientes a la duración de cada Supertrama. Un aparato o un instrumento pueden transmitir cuando sea durante una ranura de tiempo. Pero debe terminar su transmisión antes de la siguiente Supertrama de guía. El canal de acceso en las ranuras de tiempo es una contención de base; sin embargo el coordinador de PAN puede asignar intervalos o ranuras de tiempo a un solo aparato que requiera un determinado ancho de banda permanentemente o transmisiones de baja latencia. Estas ranuras de tiempo asignadas son llamadas ranuras de tiempo garantizadas (GTS, *Guaranteed Time Slot por sus siglas en inglés*) y juntas forman un periodo libre de contención localizado antes de la próxima señal de guía. El tamaño del periodo libre de contención puede variar dependiendo de la demanda de los demás aparatos asociados a la red; cuando el GTS se utiliza, todos los aparatos deben de completar todas sus transacciones de contención de base antes de que el periodo de contención libre comience.

III.10.2.2. Otras características del MAC

Dependiendo de la configuración de la red, una WPAN de baja transmisión de datos (LR-WPAN) puede utilizar uno de los dos mecanismos de acceso a los canales. En una red Beacon con Supertramas, una portadora fragmentada en varios intervalos de tiempo permite múltiples accesos con un mecanismo que evita las colisiones de información (CSMA/CA).

En una red con señal de guía o Beacon, cualquier dispositivo que desee transmitir durante el periodo de acceso de contención, espera a que empiece la siguiente ranura de tiempo y después determina si algún otro dispositivo se encuentra transmitiendo en la misma ranura de tiempo. Si algún otro dispositivo se encuentra transmitiendo en dicho momento, el dispositivo se repliega a un número aleatorio de ranuras o indica un fallo en la conexión después de varios intentos. Además en una red con señal de Beacon, las tramas ACK no utilizan CSMA.

Una función importante del MAC es la confirmación de recepciones exitosas de tramas de algún dispositivo. Las recepciones exitosas y las validaciones de datos o comandos MAC se confirman por medio de tramas ACK. Si por algún motivo el dispositivo de recepción no es capaz de recibir la información en ese momento, el receptor no manda ningún ACK. El campo de control en la trama indica si se espera un ACK o no. La trama que contiene el ACK se manda de retorno inmediatamente después de que se hace una validación exitosa de la trama de entrada. Las tramas de guía (Beacon Frames) enviadas por el coordinador del PAN y las tramas ACK nunca son respondidas con algún ACK.

En redes sin Beacon, se utiliza el estándar CSMA/CA. Estas redes trabajan de la siguiente forma. Cuando algún aparato desea transmitir en una red que no permite señales de guía, la red primero revisa si otro aparato se encuentra transmitiendo sobre el mismo canal. Si es el caso, el intento de acceso al canal se tiene que hacer en ocasiones posteriores, o indica una falla de conexión después de varios intentos fallidos. La trama ACK confirma si una

transmisión previa no utiliza los mecanismos de CSMA dado que estos se mandan inmediatamente después de cada paquete de información.

III.10.2.3. Transferencia de datos al coordinador

La transferencia de datos al coordinador puede ser con Beacon o sin Beacon.

La transferencia con Beacon quiere decir que los dispositivos escuchan la espera de un Beacon, que los dispositivos están sincronizados por la estructura de las supertramas, que los dispositivos transmiten tramas de datos usando CSMA/CA ranurado, y que el coordinador envía paquetes ACK opcionales.

La transferencia sin Beacon quiere decir que los dispositivos envían tramas de datos usando CSMA/CA no ranurado, y que el coordinador envía paquetes ACK opcionales.

III.10.2.4. Transferencia de datos desde el coordinador

También la transferencia de datos desde el coordinador puede ser con Beacon o sin Beacon.

La transferencia con Beacon quiere decir que el coordinador indica que los datos están pendientes de Beacon. Los dispositivos escuchan para recibir un Beacon. Si los datos están pendientes, el dispositivo pide los datos usando CSMA-CA ranurado. El coordinador envía un ACK para la petición de datos. El coordinador envía datos usando CSMA/CA ranurado.

La transferencia sin Beacon quiere decir que el coordinador almacena los datos hasta que el dispositivo los pide. El dispositivo emite la petición de datos sobre CSMA/CA no ranurado. El coordinador envía un ACK para la petición de datos. El coordinador envía datos usando CSMA/CA no ranurado.

III.10.2.5. Seguridad en IEEE 802.15.4

El estándar IEEE 802.15.4 proporciona tres niveles de seguridad [Mayné; 802.15.4, 2003]:

- Sin seguridad (por ejemplo, aplicaciones de publicidad).
- Control de acceso a listas (sin seguridad criptográfica).
- Seguridad con clave simétrica.

Para minimizar costos para dispositivos que no lo requieran, el método de distribución de clave no se especifica en el estándar pero se debe de incluir en capas superiores de las aplicaciones apropiadas. 128 bytes AES [Daemen y Rijmen, 1999].

III.10.3. Capa física de IEEE 802.15.4

IEEE 802.15.4 ofrece dos opciones de capa física (PHY) que combinan con el MAC para permitir un amplio rango de aplicaciones en redes. Ambas capas físicas se basan en métodos de espectro ensanchado por secuencia directa (DSSS) que resultan en bajos costos

de implementación digital, y ambas comparten la misma estructura básica de paquetes de bajo ciclo de trabajo con operaciones de bajo consumo de energía. La principal diferencia entre ambas capas físicas radica en la banda de frecuencias. La capa física a 2.4 GHz, especifica la operación en la banda industrial, médica y científica (ISM), que prácticamente está disponible en todo el mundo, mientras que la capa física a 868/915 MHz, especifica la operación en la banda de 865 MHz en Europa y 915 MHz en la banda ISM en Estados Unidos.

La segunda distinción en las características de la capa física es el rango de transmisión. La capa física a 2.4 GHz permite una transmisión de 250 kb/s, mientras que la capa física a 868/915 MHz ofrece rangos de transmisión de 20 kb/s y 40 kb/s respectivamente. Este rango superior de transmisión en la capa física a 2.4 GHz se atribuye principalmente a un orden mayor en la modulación, en la cual cada símbolo representa múltiples bits.

Los diferentes rangos de transmisión se pueden explotar para lograr una variedad de objetivos o aplicaciones. Por ejemplo la baja densidad de datos en la capa física a 868/915 MHz se puede ocupar para lograr mayor sensibilidad y mayores áreas de cobertura, con lo que se reduce el número de nodos requeridos para cubrir una área geográfica, mientras que el rango superior de transmisión en la capa física a 2.4 GHz se puede utilizar para conseguir salidas superiores y de poca latencia. Se espera que en cada capa física se encuentren aplicaciones adecuadas a cada una de ellas y a sus rangos de transmisión.

III.10.3.1. Canales IEEE 802.15.4

IEEE 802.15.4 define 27 canales de frecuencia entre las tres bandas. La capa física a 868/915 MHz soporta un solo canal entre los 868 y los 868.6 MHz, y diez canales entre los 902.0 y 928.0 MHz. Debido al soporte regional de esas dos bandas de frecuencias, es muy improbable que una sola red utilice los 11 canales. Sin embargo, las dos bandas se consideran lo suficientemente cercanas en frecuencia que se puede utilizar con el mismo hardware para ambos y así reducir costos de manufactura. La capa física a 2.4 GHz soporta 16 canales entre los 2.4 y los 2.4835 GHz con un amplio espacio entre canales (5 MHz), con el objetivo de facilitar los requerimientos de filtrado en la transmisión y en la recepción [802.15.4, 2003]. La figura 24 muestra la estructura de los canales de la IEEE 802.15.4, y la tabla III muestra su respectiva frecuencia.

El estándar fue diseñado para implementar una selección dinámica de canales, a través de una selección específica de algoritmos la cual es responsabilidad de la capa de red. La capa MAC incluye funciones de búsqueda que sigue paso a paso a través de una lista de canales permitidos en busca de una señal de guía, mientras que la capa física contiene varias funciones de bajo nivel, tales como la detección de los niveles de energía recibidos, indicadores de calidad en el enlace, así como de conmutación de canales, lo que permite asignación de canales y agilidad en la selección de frecuencias. Esas funciones son utilizadas por la red para establecer su canal inicial de operación y para cambiar los canales en respuesta a una pausa muy prolongada.

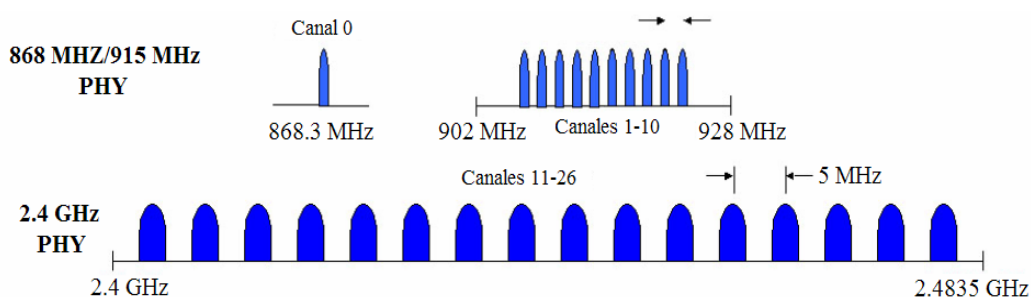


Figura 24 Estructura de los canales de la IEEE 802.15.4.

Tabla III Frecuencia de canales IEEE 802.15.4

| Número de canales | Frecuencia central del canal (MHz) |
|-------------------------|------------------------------------|
| $k = 0$ | 868.3 |
| $k = 1, 2, \dots, 10$ | $906 + 2(k-1)$ |
| $k = 11, 12, \dots, 26$ | $2405 + 5(k-11)$ |

III.10.3.2. Modulación

La PHY en los 868/915 MHz utiliza una aproximación simple DSSS en la cual cada bit transmitido se representa por un chip-15 de máxima longitud de secuencia (secuencia m). Los datos binarios son codificados al multiplicar cada secuencia m por $+1$ o -1 , y la secuencia de chip que resulta se modula dentro de la portadora utilizando BPSK (*Binary Phase Shift Keying*). Antes de la modulación se utiliza una codificación de datos diferencial para permitir una recepción diferencial coherente de baja complejidad.

La capa física a 2.4 GHz emplea una técnica de modulación semi-ortogonal basada en métodos DSSS (con propiedades similares). Los datos binarios están agrupados en símbolos de 4 bits, y cada símbolo especifica una de las 16 secuencias de transmisión semi-ortogonales de código de pseudo-ruido (PN). Las secuencias PN son concatenadas para que sean datos de símbolos exitosos, y la secuencia agregada al chip es modulada en la portadora utilizando MSK (*Minimum Shift Keying*). El uso de símbolos “casi ortogonales” simplifica la implementación a cambio de un desempeño ligeramente menor (< 0.5 dB). Los parámetros de modulación para ambas capas físicas se resumen en la tabla IV.

En términos de eficiencia (energía requerida por bit), la señalización ortogonal mejora su funcionamiento en 2 dB que BPSK diferencial. Sin embargo, en términos de sensibilidad de recepción, la capa física 868/915 MHz tiene una ventaja de 6-8 dB debido a que tiene velocidades de transmisión más bajas.

Tabla IV Parámetros de modulación

| PHY | Banda | Parámetros de los datos | | | Parámetros del chip | |
|--------------------|-------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------|-------------------------|--------|
| | | Vel. de bits (kb/s) | Vel. de símbolos (kbaud) | Mod. | Vel. de chip (kchips/s) | Mod. |
| 868/915 MHz PHY | 868.0 - 868.6 MHz | 20 | 20 | BPSK | 300 | BPSK |
| | 902.0 - 928 MHz | 40 | 40 | BPSK | 600 | BPSK |
| 2.4 GHz PHY | 2.4 - 4.4835 GHz | 250 | 62.5 | 16-aria ortogonal | 2000 | O-QPSK |

III.10.3.3. Sensibilidad y potencia

Las especificaciones actuales de sensibilidad de IEEE 802.15.4 especifican -85 dBm para la capa física a 2.4 GHz y de -92 dBm para la capa de física a 868-915 MHz [802.15.4, 2003].

Dichos valores incluyen suficiente margen para las tolerancias que se requieren debido a las imperfecciones en la fabricación, de la misma manera que permite implementar aplicaciones de bajo costo. En cada caso, los mejores equipos deben ser del orden de 10 dB mejor que las especificaciones.

Naturalmente, el rango deseado estará en función de la sensibilidad del receptor, así como de la potencia del transmisor. El estándar IEEE 802.15.4 especifica que cada dispositivo debe de ser capaz de transmitir al menos a 1 mW, pero dependiendo de las necesidades de la aplicación, la potencia de transmisión puede ser mayor o menor para aprovechar la energía. Los dispositivos típicos (1mW) se esperan que cubran un rango de entre 10-20 m.

III.10.3.4. Interferencia de y para otros dispositivos

Los dispositivos que operan en la banda de 2.4 GHz pueden recibir interferencias causadas por otros servicios que operan en dicha banda. Esta situación es aceptable en las aplicaciones que utilizan el estándar IEEE 802.15.4, las cuales requieren una baja calidad de servicio (QoS), no requieren comunicación asíncrona, y se espera que realicen varios intentos para completar la transmisión de paquetes. Por el contrario, un requerimiento

primario de las aplicaciones del IEEE 802.15.4 es una larga duración en las baterías; esto se logra con poca energía de transmisión y muy pocos ciclos de servicio.

Dado que los dispositivos IEEE 802.15.4 se pasan dormidos el 99.9 por ciento del tiempo, y ocupan transmisiones de baja energía en el espectro extendido, deben estar trabajando en la banda de los 2.4 GHz.

IV. PROPUESTA DE LA TESIS

*No hay que llamar ciencia más que al conjunto de fórmulas
que siempre tiene tanto éxito. Todo el resto es literatura.*

--Paúl Valery

IV.1. Introducción

Como se mencionó en el capítulo I, este trabajo es parte de un proyecto más general que incluye un protocolo de enrutamiento y de reservación de recursos y un algoritmo de asignación de ventanas de actividad a cada uno de los grupos de nodos que necesitan comunicarse directamente. Estas ventanas de actividad son de tamaño suficientemente grande para que en cada turno se logre enviar en promedio lo mismo que se ha acumulado. El protocolo MAC que hace falta para el intercambio de información entre los nodos de un agrupamiento durante la ventana de actividad, debe ser capaz de coordinar a los nodos para

despertar de manera simultánea, de transmitir la información de manera eficiente, y de permitir a los nodos que ya no tienen información por transmitir irse a dormir aún antes de que termine la ventana de actividad para disminuir su consumo de energía.

También es deseable que no haya colisiones debido a que esto causaría un desperdicio de energía en los nodos con lo cual se vería afectada la red en su conjunto. Las colisiones se presentan en el momento en que todos los nodos están tratando de transmitir su información, dos o más nodos empiezan a transmitir sin percatarse de que ya existe otra transmisión en curso, con lo cual provocan una colisión.

En base a lo anterior es pertinente pensar que PCF [802.11, 1999] es una buena opción para el intercambio eficiente de información, y sólo haría falta una modificación para coordinar el encendido y apagado de los nodos. El cabeza de agrupamiento funcionaría como el coordinador puntual (PC).

Creemos que la propuesta de la modificación a la PCF es adecuada debido a que cada cabeza de agrupamiento sabe quiénes son sus nodos asociados, lo que facilita el envío de encuestas. Además, la ventana de actividad está calculada para ser de tamaño suficiente para atender a todos los nodos del agrupamiento. También permite a los nodos irse a dormir en cuanto envían los datos acumulados. PCF también incluye mecanismos para informar al coordinador puntual que ya no hay mas datos por transmitir (mediante tramas NULL o mediante los bits more-frags, more-data), lo que ayuda para que ya no se envíen encuestas a aquellos nodos que ya no tienen datos por transmitir y que incluso ya pasaron al estado de

dormidos. Finalmente no es necesario hacer diferenciación paquete por paquete, porque la transmisión en cada agrupamiento es sólo un paso de varios que tienen que dar los paquetes en su viaje rumbo al sink, por lo que una asignación de oportunidades de transmisión mediante rondas cíclicas (round robin) es suficiente.

Por lo anterior, el protocolo MAC que será usado durante la ventana de actividad de cada agrupamiento es PCF. La cabeza de agrupamiento actuará como coordinador puntual (PC) y encuestará a cada miembro del agrupamiento mediante rondas cíclicas (round robin). Tan pronto como un nodo indique a la cabeza del agrupamiento que no tiene nada más para transmitir por el momento (a través de una trama NULL o a través de una trama de datos en el cual ambos bits de mas-datos y mas-fragmentos son puestos en FALSO), éste no será más encuestado durante la actual ventana de actividad. Cuando la ventana de actividad se termine, todos los nodos en el agrupamiento incluyendo a la cabeza, se dormirán. Pueden dormir antes si todos los nodos del agrupamiento le indican a la cabeza del agrupamiento que no tienen más datos para transmitir.

Se puede pensar que este protocolo MAC es una combinación de TDMA y de PCF en el sentido de que las transmisiones se separan en ranuras de tiempo para los diferentes agrupamientos mediante la asignación de ventanas de actividad y se coordinan mediante encuestas dentro de cada agrupamiento.

Note que aquellos nodos que sean cabezas de agrupamiento serán parte de dos agrupamientos, uno en el cual ellos son la cabeza y reciben datos de los otros nodos en el

agrupamiento, y otro en el cual ellos sólo son miembros del agrupamiento y envían a la cabeza de este nuevo agrupamiento sus propios datos y los que recibieron de otros nodos.

Cabe enfatizar que este mecanismo de intercambio de información entre miembros de un mismo agrupamiento dentro de la ventana de actividad es el trabajo principal de esta tesis de maestría.

El resto de este capítulo está dividido en 2 partes. En la primera se explica la forma en que opera la PCF dentro de OPNET, y en la segunda se detallan todas las modificaciones hechas al protocolo PCF. Llamamos PCF + Dormir al protocolo resultante. Dichas modificaciones se realizaron en un simulador de redes llamado OPNET, el cual será descrito con mayor profundidad en el capítulo V. Se modificó dentro de OPNET el modelo de procesos de la subcapa MAC del estándar 802.11 de manera que básicamente se agregó un estado llamado “sleep”, al cual un nodo entra debido a varias circunstancias, las cuales se explicarán a continuación.

IV.2. Funcionamiento de la PCF en OPNET

Para explicar mejor el funcionamiento de la PCF se verán las principales operaciones llevadas a cabo por el PC y por las estaciones móviles en este modelo.

Inicialización y creación de lista de encuesta

Al inicio del programa en el estado **BSS_INIT** el PC genera una lista de las estaciones en la BSS que pueden responder a una encuesta y las ordena por dirección MAC en forma ascendente. Esta lista se utiliza para realizar la encuesta y se llama `polling_list`.

Reservación del medio durante el periodo libre contienda (CFP)

La reservación del medio se hace cuando el PC envía a todas las estaciones la trama de aviso (beacon) y éstas fijan su NAV para no intentar transmitir durante ese periodo de tiempo, como se describe en la figura 25. La primera vez, en el estado **BSS_INIT**, el PC programa una interrupción que indica que se debe enviar la trama de aviso. Los siguientes avisos se programan en otra función, como veremos adelante.

Inicialmente, el control del programa se encuentra en el estado **IDLE**. Cuando se genera alguna interrupción se ejecuta la función `wlan_interrupts_process()` que se encuentra dentro del bloque de funciones.

Cuando se genera la interrupción de inicio del CFP la función `wlan_interrupts_process()` programa la interrupción para el fin del CFP actual y el inicio del siguiente. Si se trata de iniciar el CFP entonces se debe enviar la trama de aviso y el control del programa pasa al estado **TRANSMIT**.

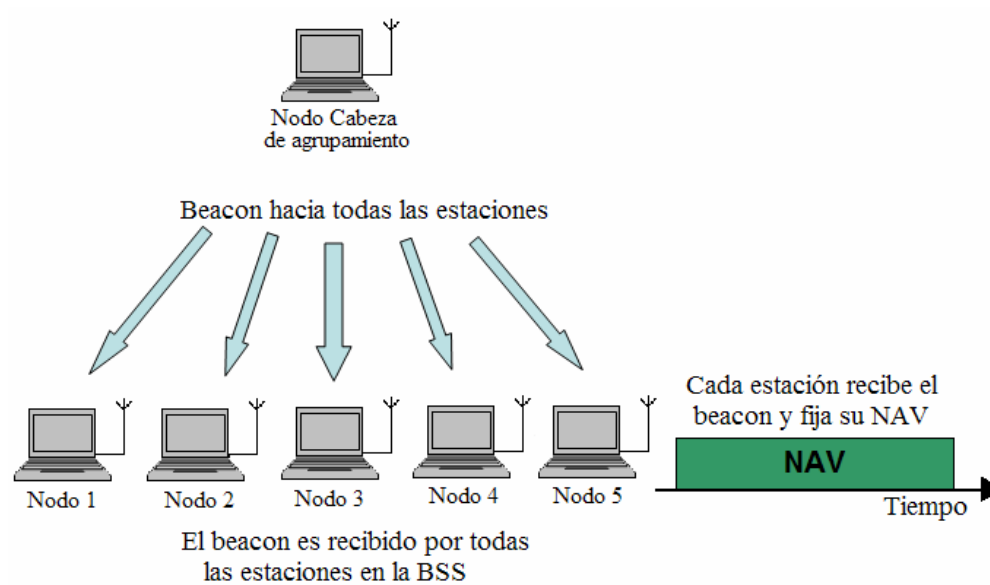


Figura 25 Envío de beacon a las estaciones en la BSS.

En el estado **TRANSMIT** se llama a la función `wlan_frame_transmit()` en la que se decide, de acuerdo al tipo de trama, la dirección destino que llevará y se ejecuta a la función `wlan_prepare_frame_to_send()`.

En la función `wlan_prepare_frame_to_send()` se genera, se prepara y se envía la trama de aviso.

Recepción de la trama de aviso

Cuando una estación está inactiva se encuentra en el estado **IDLE**. Una vez que recibe alguna trama se ejecuta la función `wlan_interrupts_process()`. Si se trata de una trama de aviso se hará un llamado a la función `wlan_physical_layer_data_arrival()`, en donde se

obtiene el valor del NAV de la trama y con este valor se fija el NAV de la estación, como se observó en la figura 25.

Encuestado de estaciones de la BSS

Una vez que el PC envía el aviso, espera un tiempo de intertrama corto (SIFS) y regresa el control al estado **TRANSMIT** en la función `wlan_frame_transmit()`, donde empezará a encuestar a las estaciones que se encuentren en la lista de encuesta. La encuesta se realiza en forma ascendente de acuerdo a la dirección MAC, y se empieza a encuestar a la estación número uno en la lista, en cada inicio de CFP. Cada vez que se va a encuestar a una estación se incrementa un contador de número de encuestas. Una vez que se decide a quién va a ser dirigida la encuesta se llama a la función `wlan_frame_transmit()`, donde se prepara y se envía la trama de encuesta.

Después de enviar la encuesta, el PC pasa a un estado de espera (**WAIT_FOR_RESPONSE**) por un periodo de SIFS o hasta que recibe una respuesta de la estación encuestada. Si el tiempo se termina, entonces el PC regresa al estado de **TRANSMIT** para volver a encuestar a la misma estación o encuestar a la siguiente en la lista. El número de veces que se encuesta a una estación sin recibir respuesta de ella, está determinado por un límite llamado `retry_limit`. Si se llega a este valor, entonces encuestará a la siguiente estación en la lista.

Cada vez que el PC recibe una trama de la estación encuestada verifica un campo llamado `more_frag` que indica si la estación todavía tiene tramas pendientes que enviar

correspondientes al paquete de capa superior que está siendo transmitido. Si esta bandera es igual a verdadero, entonces el PC volverá a encuestar a esta estación hasta que sea igual a falso, es decir, hasta que la estación no tenga tramas pendientes que enviar. Posteriormente el PC verificará el campo llamado `more_data` que le indica si la estación tiene otro paquete por enviar, si esta bandera es igual a verdadero, entonces el PC volverá a encuestar a la estación hasta que sea igual a falso, es decir, hasta que la estación no tenga mas paquetes que enviar. El PC sabrá que la estación ha terminado con su transmisión cuando las banderas de los campos `more_frag` y `more_data` sean igual a falso.

Recepción y envío de tramas en el PC

Cuando el PC recibe una respuesta de la estación encuestada llama a la función `wlan_physical_layer_data_arrival()`. Aquí se verifica que la trama proceda de la estación encuestada y de qué tipo de trama se trata. La estación puede enviar ya sea una trama de datos o una trama llamada `Data_Null` que indica que la estación no tiene nada que enviar. Si el PC recibe una trama de datos de la estación, la trama es almacenada en una lista de tramas de acuerdo a la estación destino. Enseguida pasa al estado de **TRANSMIT** donde envía un reconocimiento (ACK) a la estación emisora.

Recepción de trama en las estaciones y envío de ACK al PC

Cuando la estación recibe una trama, primero llama a la función `wlan_interrupts_process()` para determinar el tipo de interrupción. Si se trata de la llegada de una trama, llama a la función `wlan_physical_layer_data_arrival()` para obtener la trama recibida y mandarla a

capas superiores (sólo si es de datos) . Finalmente, la estación responde a la encuesta con una trama si tiene algo pendiente que enviar o con un ACK en caso contrario.

Finalizar el CFP

Cuando se genera la interrupción para la finalización del periodo libre de contienda en el PC, en la función `wlan_interrupts_process()` se actualiza una bandera llamada `tx_cfp_end` que indica que debe enviarse la trama de fin de CFP. Sin embargo, el periodo libre de contienda no termina en ese momento. Si el PC está encuestando a una estación que todavía tiene paquetes pendientes, entonces pospone el envío de la trama de fin de CFP hasta que termine de encuestar a dicha estación. Una vez que ha terminado, regresa al estado **TRANSMIT** y la función `wlan_frame_transmit()` llama a `wlan_prepare_frame_to_send()` quien genera y envía la trama de fin de CFP. Es hasta entonces cuando realmente finaliza el CFP.

Cuando las estaciones móviles reciben una trama de fin de CFP, actualizarán una bandera que indica que se encuentran fuera del CFP, lo que les permitirá iniciar el proceso de competencia por el canal en caso necesario.

IV.3. Modelo PCF + Dormir propuesto

La propuesta de esta tesis esta basada en la modificación del protocolo PCF, de manera que le dé oportunidad a los nodos de ir a dormir después de ciertas condiciones, logrando con esto que ahorren energía y tomando en cuenta requerimientos de calidad de servicio.

Para poder explicar el funcionamiento de PCF modificado es necesario dar un breve recordatorio de cómo funciona la PCF original. En este protocolo el coordinador puntual realiza encuestas repetidas a cada estación, de tal forma que le permite transmitir en cada turno todos los paquetes que haya acumulado desde su último turno. Hace lo mismo con todas las estaciones, una por una, hasta terminar con todas, y vuelve a empezar el ciclo. Este procedimiento tiene la desventaja de que si alguna estación acumuló muchos paquetes por algún motivo, causará un retardo excesivo en las demás estaciones, además de introducir inequidades. La primera modificación al protocolo consistió en encuestar a cada nodo una sola vez en cada ciclo, de tal manera que todas tengan aproximadamente el mismo número de oportunidades de transmitir en cada ventana de actividad.

Sé modificó también PCF para que el cabeza de agrupamiento (coordinador puntual) tome en cuenta la información que recibe del protocolo de enrutamiento, relacionada con cuáles nodos pertenecen al agrupamiento, así como el tamaño de la ventana de actividad correspondiente a dicho agrupamiento y su posición dentro de la supertrama. La obtención de estos valores no es parte de esta tesis, debido a que dichos valores se obtienen dentro del protocolo de enrutamiento definido en otro trabajo de tesis [Molina López] que se está realizando a la par de ésta, como se mencionó anteriormente. Así que este trabajo de tesis sólo se limita a usar estos valores.

Nuestra propuesta de la PCF es llamada PCF + Dormir y las modificaciones que tiene son las siguientes:

- Lo primero que se modificó fue la función `wlan_frame_transmit` para encuestar una sola vez a cada estación de la lista de encuestas.
- También se agregó un nuevo estado que denominamos “*sleep*” dentro del modelo de procesos correspondiente a la subcapa MAC del estándar IEEE 802.11. El estado *sleep* permite que los nodos manden sus radios a dormir para conservar energía. Los nodos individualmente controlan su estado de dormir mediante la calendarización apropiada de auto interrupciones de dormir y despertar. Cuando la interrupción de dormir ocurre, una rutina de servicio conmuta el nodo al modo de dormir. Los nodos guardan la información de sus estados antes de dormirse y reinician sus actividades regulares al despertar.
- Lo siguiente que se tomó en cuenta y se agregó a nuestra propuesta fue la de no volver a encuestar dentro de una ventana de actividad dada a aquellos nodos que explícitamente avisen que ya no tienen datos por transmitir. Se modificó también el programa para que estos nodos se fueran a dormir y ahorraran energía.
- Se utilizaron los campos `morefrag` y `moredata` para indicar si el nodo ha terminado de transmitir o no.
- Acabando un nodo de transmitir se va a ir a dormir. La figura 26 muestra la estructura de la supertrama, que está dividida en dos partes. La primera muestra la ventana de actividad, que es el intervalo en el que los nodos dentro del agrupamiento pueden estar

despiertos, y la segunda muestra la ventana de no actividad en la que todos los nodos del agrupamiento deben estar dormidos. Durante la segunda parte de la supertrama otros agrupamientos se despertarán y transmitirán.

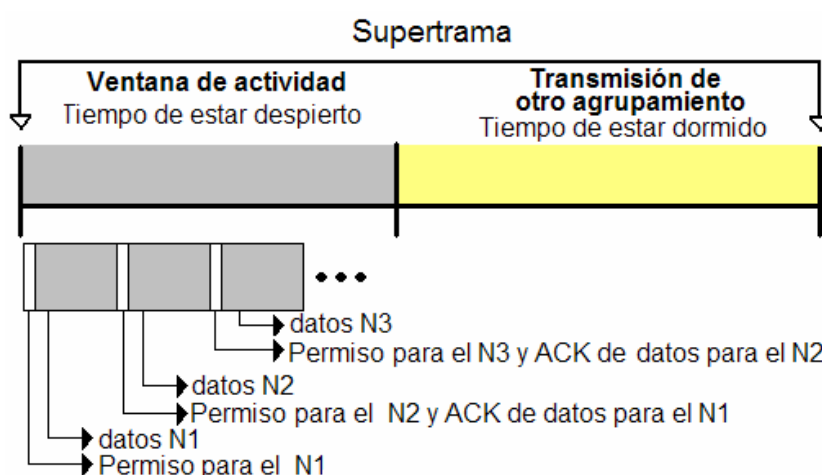


Figura 26 Estructura de la supertrama.

- Si estando en el estado de transmitir se detecta que lo que resta de la ventana de actividad no es suficiente para transmitir una trama completa, además de apagar su transmisor y receptor, los nodos antes de irse a dormir tendrán que hacer lo que hubieran hecho en caso de ser una transmisión no exitosa, es decir; dejar la trama en la cola de transmisión y volver a intentarlo después, pero sin incrementar el contador de intentos.

Para simular que los nodos dormidos en opnet apagan su transmisor y receptor fue necesario modificar la función *wlan_physical_layer_data_arrival* de manera que si se

recibe un paquete de la capa física cuando la subcapa MAC está en el estado de dormido, éste lo elimina inmediatamente.

- Todos los nodos de cada agrupamiento deben estar conscientes del tiempo de despertar y de irse a dormir. Esto se logra mediante 2 autointerrupciones que son programadas en el momento en que se despiertan todos los nodos, de manera que esto es lo primero que hacen al despertarse:
 - Activan la primera autointerrupción que es necesaria para irse a dormir a más tardar al final de la ventana
 - Activan la segunda autointerrupción que se necesita para despertarse en la siguiente supertrama.

Estas autointerrupciones se realizaron en opnet mediante la modificación de la función *wlan_interrupts_process* que se encuentra dentro del bloque de funciones de la subcapa MAC. En dicha función se agregó el código necesario para que al detectarse alguna de estas interrupciones, el nodo pudiera ya sea dormirse o despertarse y además actualizar su nivel de energía actual. Esta es otra función que se agregó a la PCF + Dormir y que se explicará a continuación.

La figura 27 muestra cuándo los nodos se tienen que despertar, cuándo se tienen que dormir a más tardar y cuándo se tendrán que volver a despertar.

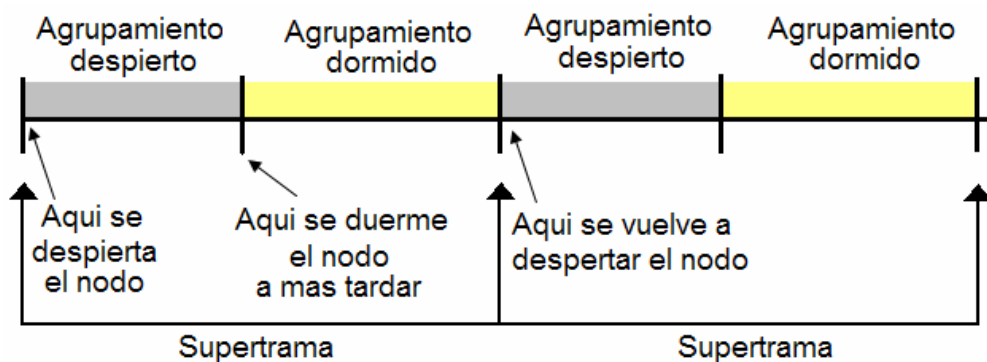


Figura 27 Estructura de la supertrama.

- La PCF + Dormir tiene una función nueva llamada *“update_energy”* la cual toma en cuenta la energía que se está consumiendo en los diferentes estados en que puede estar un nodo. Hay 3 grupos de estados:
 - **Transmitiendo.** Es cuando el nodo se encuentra en el estado *TRANSMIT* de opnet, transmitiendo alguna trama.
 - **Durmiendo.** Esto sucede cuando el nodo se encuentra en el estado nuevo de *SLEEP* de opnet, y no está transmitiendo ni escuchando el medio.
 - **No transmitiendo.** Este ocurre cuando el nodo no esta transmitiendo pero tiene al receptor encendido. Se puede estar aquí si el nodo se encuentra en los estados *IDLE*, *DEFER*, *BACKOFF*, *BACKOFF_NEEDED*, *FRM_END*, *WAIT_FOR_RESPONSE* y *SCAN*.

Los nodos al ingresar a cualquier estado del modelo de procesos de la subcapa MAC, inicializan un contador que guarda el tiempo que dicho nodo estuvo en este estado, para posteriormente indicárselo a la función *update_energy* y que ésta a su vez haga los cálculos necesarios para saber cuánta energía consumió el nodo y cuánta le queda.

Los valores de la corriente consumida por un nodo durante la transmisión, recepción o mientras duerme se encuentran en la tabla V y fueron obtenidos de [Brownfield *et al.*, 2005].

Tabla V Valores para el cálculo de la corriente consumida.

| | |
|--|-----------|
| Promedio de corriente consumida mientras recibe (A) | 0.02156 |
| Promedio de corriente consumida mientras transmite (A) | 0.0184 |
| Promedio de corriente consumida mientras duerme (A) | 0.0000376 |
| Voltaje de la batería usada (V) | 3 |
| Energía inicial de un nodo (J) | 3240 |

Con estas modificaciones, la PCF + Dormir funcionará de la siguiente manera. Todos los nodos se despertarán juntos y lo primero que harán será programar dos autointerrupciones. Una se usa para irse a dormir a más tardar al final de la ventana, y es necesaria por si acaso no les alcanza el tiempo para transmitir toda su información, de manera que estén enterados

de que no podrán pasarse de ese límite. La segunda autointerrupción es para que se despierten en la siguiente supertrama, evitando así que se queden dormidos de por vida. Todo este procedimiento se puede apreciar mejor en la figura 27.

Después de haberse despertado todos los nodos y de haber programado sus dos respectivas autointerrupciones, se empieza con las transmisiones de información. Dichas transmisiones son permitidas por el coordinador puntual, el cual empieza a encuestar a las estaciones una por una pero ahora con la modificación de darles una pequeña ventana de tiempo a todas para poder transmitir, de manera que todas tengan la misma oportunidad. Esto se puede apreciar mejor en la figura 26, en donde se puede ver que el PC le otorga un permiso al nodo 1 para transmitir, posteriormente el nodo 1 transmite, y seguido a esto el PC le otorga el permiso para transmitir al nodo 2 y además le manda el ACK al nodo 1. Este mecanismo se repite hasta terminar de encuestar a todos los nodos en el agrupamiento y posteriormente vuelve a empezar con el nodo 1.

Los nodos utilizan los campos `morefrag` y `moredata` para indicarle al coordinador puntual si necesitan seguir transmitiendo o no.

Los nodos pueden ir a dormir bajo tres condiciones:

- Cuando un nodo no tiene datos por transmitir al inicio de la ventana, se esperará a recibir la primera encuesta para informar a la cabeza de agrupamiento mediante una trama NULL que ya no debe encuestarla y se irá a dormir.

- Cuando un nodo acaba de transmitir toda su información y le avisa al PC que ya acabó con todos sus datos, poniendo en cero los bits `more_frag` y `more_data`, en ese momento se va al estado dormir.
- Cuando la ventana de actividad se termina y por ende en ese momento la autointerrupción que activó al momento de despertarse se habilita mandando a dormir a todos los nodos que seguían despiertos esperando terminar con la transmisión de sus datos, pero que por causa de tiempo no alcanzaron y tendrán que irse al estado de dormir para no interferir con la transmisión de otro agrupamiento que empieza a despertar.

El PC continuará encuestando a las estaciones que sigan despiertas hasta que todas acaben o hasta que se le acabe la ventana de actividad. Si todas las estaciones se fueron a dormir, de manera que el PC ya no tenga a quién encuestar, en ese momento el PC también se irá a dormir.

V. SIMULACIÓN Y RESULTADOS

Es intentando lo imposible, como se realiza lo posible.

--Henri Barbusse

V.1. Introducción

Las simulaciones de sistemas utilizando equipos informáticos son en la actualidad una gran herramienta para el área de las telecomunicaciones. En ellas se puede observar la evolución del sistema, sus características, propiedades, etc., existiendo únicamente en la memoria de una computadora. El objetivo que busca todo simulador es recrear un modelo lo más fiable posible a la realidad, logrando con esto obtener resultados sin tener que implementar la red físicamente.

En el campo de las redes de telecomunicaciones se ha experimentado un crecimiento exponencial en el número de usuarios a nivel mundial, lo que ha dado lugar a la necesidad de su sofisticación. Por ello se tiene como prioridad disponer de un simulador de red que ofrezca herramientas potentes con el objetivo de crear modelos, simular su operación, así como obtener y analizar sus parámetros de desempeño.

OPNET Modeler es capaz de simular una gran variedad de redes. El flujo de mensajes de datos, paquetes perdidos, mensajes de control de flujo, caídas de los enlaces, son algunas de las opciones que nos permite estudiar este simulador; proporcionando a las universidades e ingenieros la forma más efectiva para demostrar los diferentes tipos de redes y protocolos.

OPNET proporciona bibliotecas de modelos y gracias a ellas se consigue la formación de redes de comunicaciones y se facilita el estudio del desarrollo de los modelos mediante la conexión de diferentes tipos de nodos, utilizando diferentes tipos de enlaces.

Este capítulo está dividido en 2 partes. En la primera se describe la forma en que opera la estructura jerárquica de OPNET, y en la segunda parte se presentan los resultados obtenidos de dichas simulaciones, así como un análisis de los mismos.

V.1.1. Descripción de la estructura jerárquica de OPNET

Utilizando un buen simulador es posible obtener resultados confiables sobre el desempeño de un sistema. Para la implementación de PCF + Dormir se utilizó la Herramienta de

Simulación de Ingeniería de Red Optimizada (OPNET, Optimized Network Engineering Tool) versión 11.5.A PL3. OPNET divide los modelos en tres niveles: Red, Nodos y Procesos, cubriendo todos los niveles jerárquicos (o dominios) de un modelo. La figura 28 muestra la jerarquía de diseño en OPNET.

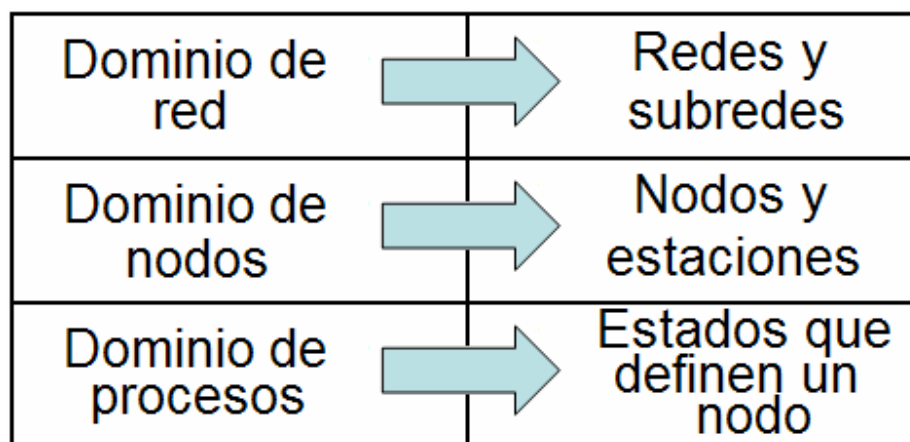


Figura 28 Jerarquía de diseño en OPNET.

A continuación se describe brevemente cada dominio:

Dominio de Red

Se refiere a las especificaciones de un sistema en términos de dispositivos de alto nivel llamados nodos y enlaces de comunicación entre ellos. Físicamente los nodos corresponden a varios tipos de equipos de comunicaciones, tales como: enrutadores, puentes, conmutadores, terminales, computadoras, servidores, etc.

Es la descripción general de los objetos contenidos en el sistema, especificando la localización física, configuración e interconexión entre ellos. Para la implementación de PCF + Dormir, se empleo el modelo de 802.11 incluido dentro de OPNET, el cual fue construido basándose en el estándar de IEEE 802.11.

Dominio de Nodos

Especifica las capacidades de los nodos en términos de la aplicación, del procesamiento, del encolamiento y de las interfaces de comunicación. Cada nodo, a su vez, puede contar con varios bloques que ejecuten tareas independientes. Estos bloques pueden corresponder a las diferentes capas o subcapas de los protocolos de comunicaciones, tales como aplicación, TCP, IP, MAC, etc.

Dominio de Procesos

Se refiere a las especificaciones de comportamiento para los procesos que operan dentro de los bloques que constituyen cada nodo del sistema. Un proceso se define a través de un diagrama de estados, de las acciones que se ejecuten en cada estado y de las condiciones para la transición entre estados.

El modelo de procesos en OPNET se puede usar para implementar una gran variedad de subsistemas (hardware y software), incluyendo protocolos de comunicación, algoritmos, disciplinas de servicio, generadores de tráfico, colectores de estadísticas, etc. Un proceso individual o un grupo de procesos se definen para implementar una tarea particular dentro de un módulo.

El modelo de procesos es implementado a través de máquinas de estado finito (FSM, *Finite State Machine*) conectadas por medio de líneas de transición, las cuales se dan a través de interrupciones. Dentro de los estados se puede incluir un código de programación para que realice una cierta tarea. El lenguaje de programación de OPNET es PROTO C que es compatible con C++, con algunas adiciones que facilitan la compilación de los programas para su ejecución. Las FSM pueden ser representadas a través de estados forzados o no forzados. Dentro de OPNET los estados forzados son de color verde, mientras que los estados no forzados son de color rojo. La diferencia entre ellos se explica enseguida.

El código por ejecutar en cada estado se divide en dos partes: las instrucciones de entrada, que se ejecutan cuando la FSM llega al estado, y las de salida, que se ejecutan cuando la FSM está a punto de transitar a otro estado. Si se trata de un estado no forzado, después de ejecutar las instrucciones de entrada la FSM detendrá temporalmente la ejecución (estará latente) y sólo ejecutará las instrucciones de salida cuando se dé una interrupción para posteriormente pasar a otro estado. Cuando se trata de estados forzados, no hay pausa entre la ejecución de las instrucciones de entrada/salida y la transición al siguiente estado.

Las interrupciones pueden deberse a la recepción de un paquete, pueden provenir de otro módulo, o bien, puede tratarse de interrupciones calendarizadas por el mismo módulo (autointerrupciones).

Las transiciones entre los estados pueden ser condicionadas o incondicionales. Una transición condicionada implica que para pasar al siguiente estado forzosamente se debe

cumplir con alguna condición específica. Las transiciones incondicionales indican que no hay condiciones que cumplir.

Una simulación en OPNET opera bajo una secuencia de estados para un sistema determinado. El modelo evoluciona a través de estos estados en función del tiempo, basándose en el comportamiento de los componentes del modelo y de sus interacciones. La noción del tiempo de una simulación no está directamente relacionada con el tiempo que toma para correr la simulación. Las simulaciones en OPNET están basadas en eventos discretos, donde el progreso del modelo en términos del tiempo de simulación está dado por puntos individuales, en donde puede ocurrir un cambio. El término dado por OPNET para estos puntos es “eventos”. OPNET permite que ocurran múltiples eventos simultáneamente, lo que da una idea de que el tiempo de ejecución de una tarea puede ser cero.

La implementación de las modificaciones a PCF da como resultado lo que denominamos PCF + Dormir, y se realizó bajo los dominios de red, nodo y proceso.

Proyectos y escenarios

Un escenario incluye red, nodo y proceso, más parámetros de simulación. Un proyecto puede consistir de varios escenarios.

V.1.2. Modelo IEEE 802.11 ORIGINAL

OPNET incluye un modelo de simulación de 802.11 original, de manera que para empezar con nuestra tesis fue necesario basarse en este modelo y a partir de ahí modificarlo para que

fuera compatible con nuestra propuesta. El modelo de 802.11 de OPNET incluye un escenario para la PCF. La modificación más importante consistió en sustituir el bloque correspondiente a la subcapa MAC con una nueva versión de la PCF la cual es llamada PCF + Dormir y que se explicó en el capítulo anterior.

V.1.2.1. Modelo de red

El modelo de red utilizado es un BSS de infraestructura con un cabeza de agrupamiento (Nodo_PC) y 5 estaciones de trabajo. En la figura 29 se muestra el dominio de red de nuestra propuesta.

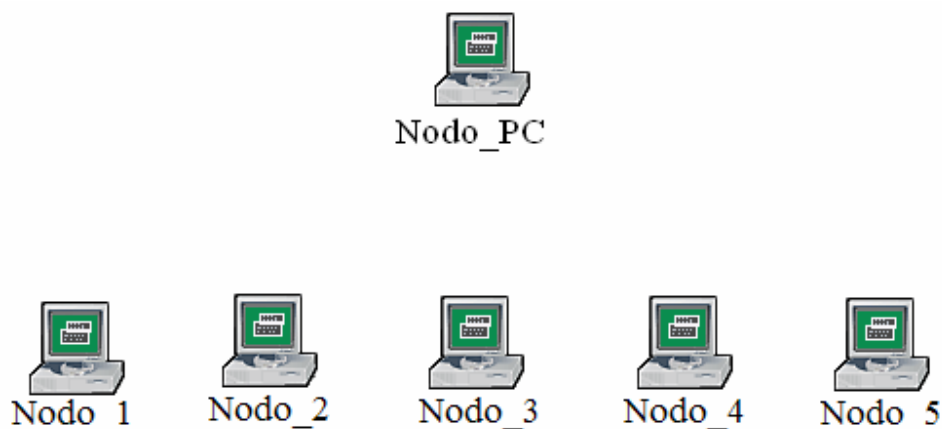


Figura 29 Dominio de red de nuestra propuesta.

V.1.2.2. Modelo de nodos

El modelo de nodos que se muestra en la figura 30 es donde se encuentra el proceso de la capa MAC. Este modelo de nodos es igual para todas las estaciones. Para la realización de este trabajo se modificó el proceso llamado “wireless_lan_mac” que se observa en la figura 30.

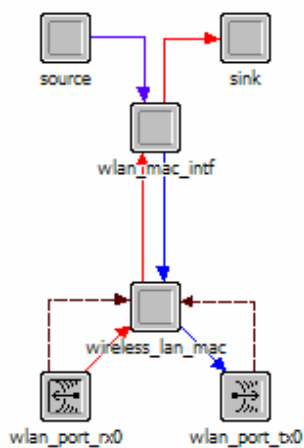


Figura 30 Dominio de nodos del modelo utilizado.

V.1.2.3. Modelo de procesos

El modelo de procesos correspondiente a la subcapa MAC del estándar IEEE 802.11 se muestra en la figura 31. Esta tesis está basada en este modelo de procesos ya que los estados y las condiciones de transición no cambian, aunque sí se modifican las acciones que se toman en algunos estados debido a que se le agregó el estado “sleep”, como se describió

en el capítulo anterior. Cabe mencionar que este mismo modelo puede funcionar como PC o como estación móvil, dependiendo del valor que se le dé al parámetro *Funcionamiento de PC*.

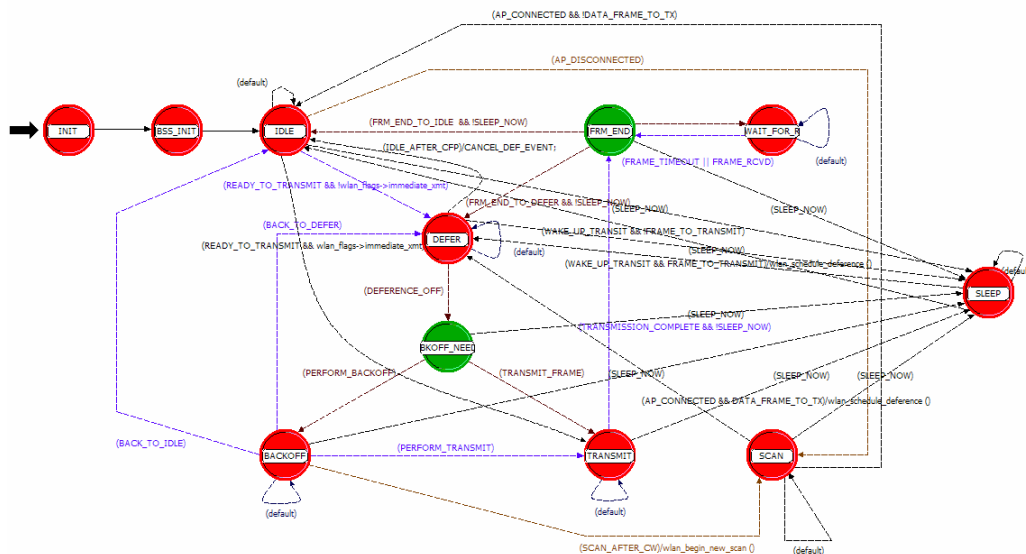


Figura 31 Modelo de la subcapa MAC con el estado “sleep” agregado.

Este modelo cuenta con un bloque de funciones (FB, *Function Block*) que realizan tareas necesarias para controlar y ejecutar las dos funciones principales de la capa MAC: la DCF y la PCF. Para realizar este proyecto sólo se trabajó en lo relacionado con la función PCF. A continuación, en la tabla VI, se muestra la lista de las funciones del FB, resaltando con negritas las funciones más importantes que se modificaron para implementar el estado “sleep” logrando con esto una nueva versión de la PCF a la que se le denominó PCF + Dormir.

Tabla VI Lista de funciones del programa original

| | |
|---|--|
| 1. wlan_mac_sv_init | 15. wlan_data_process |
| 2. wlan_transceiver_channel_init | 16. wlan_accepted_frame_stats_update |
| 3. wlan_higher_layer_data_arrival | 17. wlan_schedule_deference |
| 4. wlan_hl_packet_drop | 18. wlan_frame_discard |
| 5. wlan_hlpk_enqueue | 19. wlan_pcf_frame_discard |
| 6. wlan_frame_transmit | 20. wlan_mac_rcv_channel_status_update |
| 7. wlan_non_11b_plcp_overhead_compute | 21. wlan_poll_list_member_find |
| 8. wlan_plcp_overhead_ofdm_compute | 22. wlan_sta_addr_register |
| 9. wlan_dest_is_11g_enabled | 23. wlan_sta_addr_deregister |
| 10. wlan_prepare_frame_to_send | 24. wlan_begin_new_scan |
| 11. wlan_slot_time_set | 25. wlan_ap_switch |
| 12. wlan_interrupts_process | 26. wlan_reset_sv |
| 13. wlan_physical_layer_data_arrival | 27. wlan_find_new_ap_virtual |
| 14. wlan_tuple_find | 28. wlan_hld_list_elem_add_comp |

Además se agregó una nueva función llamada “update_energy”, la cual se encarga de llevar el control de cuánta energía han gastado los nodos dependiendo del tiempo que duren en cada estado.

V.2. Parámetros de simulación

Para llevar a cabo el proceso de simulación del sistema implementado a través de OPNET se tomó en cuenta la configuración mostrada en la figura 29, que muestra el dominio de red de nuestra propuesta, que consta de 6 estaciones, una es el PC y las otras 5 son las estaciones normales.

Los parámetros de simulación fueron obtenidos en base a los datos generados por los otros 2 trabajos de tesis que se realizan a la par de éste, dichos parámetros fueron implementados dentro del dominio de red de nuestra propuesta. El ciclo de trabajo de nuestros nodos es de 15%. La ventana de actividad dada por [Ruiz Ibarra, 2006] es de 0.5 segundos y la tasa de transmisión de cada nodo es de 10 kbps.

Los parámetros de simulación son iguales para todas nuestras estaciones y se muestran en la tabla VII. El parámetro *Funcionalidad de Coordinador Puntual* sirve para indicar cuál de las estaciones en una BSS funcionará como coordinador puntual, por lo que se habilita sólo para el PC, todas las demás estaciones en la BSS tienen este parámetro deshabilitado.

Tabla VII Parámetros de simulación de la WLAN

| | |
|--|---------------------------------------|
| ❖ Argumentos de la generación de paquetes | |
| Tiempo de interarribo (segundos) | Constante (0.0943999999999999) |
| Tamaño de paquete (bytes) | Constante (118) |
| Tamaño de segmentación (bytes) | 100 |
| Umbral RTS (bytes) | Ninguno |
| Umbral de fragmentación (bytes) | 50 |
| Tasa de transmisión (bps) | 2 Mbps |
| Características físicas | Secuencia directa |
| Límite de retransmisión corto | 7 |
| Límite de retransmisión largo | 4 |
| Funcionalidad de Coordinador Puntual | Habilitado (Sólo para el PC) |
| ❖ Configuración de Canal | |
| Ancho de Banda (Mhz) | Dependiente de la tecnología física |
| Frecuencia mínima (Mhz) | Basada en la BSS |
| Tamaño del buffer (bits) | 2024000 |
| Tiempo de vida de recepción máximo (segundos) | 0.5 |
| Procesamiento de paquetes grandes | Fragmentación |
| Identificador de la BSS | Asignado automáticamente |
| ❖ Parámetros PCF | |
| Funcionalidad PCF | Habilitada |
| Múltiple <i>beacon</i> CFP | 1 |
| Desplazamiento CFP | 0 |
| Intervalo CFP (segundos) | 0.075 |
| Máximo número de encuestas fallidas | 2 |
| Intervalo de <i>Beacon del PC</i> (segundos) | 0.5 |

V.3. Resultados de las simulaciones

Se realizaron 2 tipos de simulaciones, unas con una duración de 10 minutos y otras de 1 hora, se obtuvieron gráficas de las 6 estaciones y además del agrupamiento en general, sin embargo, sólo se presentan en esta tesis los resultados de algunas estaciones pues en todas ocurrieron resultados similares.

A continuación se muestran, a través de gráficas, los resultados obtenidos de las simulaciones del modelo propuesto llamado PCF + Dormir y del SMAC. Dichos resultados son del tiempo dormido, del consumo de energía y del retardo promedio.

V.3.1. Simulación del tiempo dormido

Tiempo de simulación de 10 minutos

La tabla VIII muestra el tiempo dormido por nodo, en ésta se puede notar que el mayor tiempo dormido en todos los nodos incluyendo el nodo PC, lo tiene el modelo PCF + Dormir. Los nodos de PCF + Dormir duermen en promedio un poco más de 1 minuto en comparación con los de SMAC.

Tabla VIII Tiempo dormido por nodo del agrupamiento.

| | Tiempo dormido (min) | |
|---------|-----------------------------|-------------|
| | PCF + Dormir | SMAC |
| Nodo 1 | 9.727571817 | 8.23791667 |
| Nodo 2 | 9.477742517 | 8.21666667 |
| Nodo 3 | 9.228146583 | 8.19541667 |
| Nodo 4 | 8.978316733 | 8.30166667 |
| Nodo 5 | 8.728611617 | 8.27333333 |
| Nodo PC | 8.721376167 | 6.34666667 |

Tiempo de simulación de 1 hora

La figura 32 muestra la gráfica del tiempo dormido del agrupamiento total con una simulación de 1 hora. En ella se puede apreciar cómo es mayor el tiempo dormido de nuestro modelo propuesto PCF + Dormir que el de SMAC. A continuación se muestra la tabla IX, en la cual se observa el tiempo dormido por nodo.

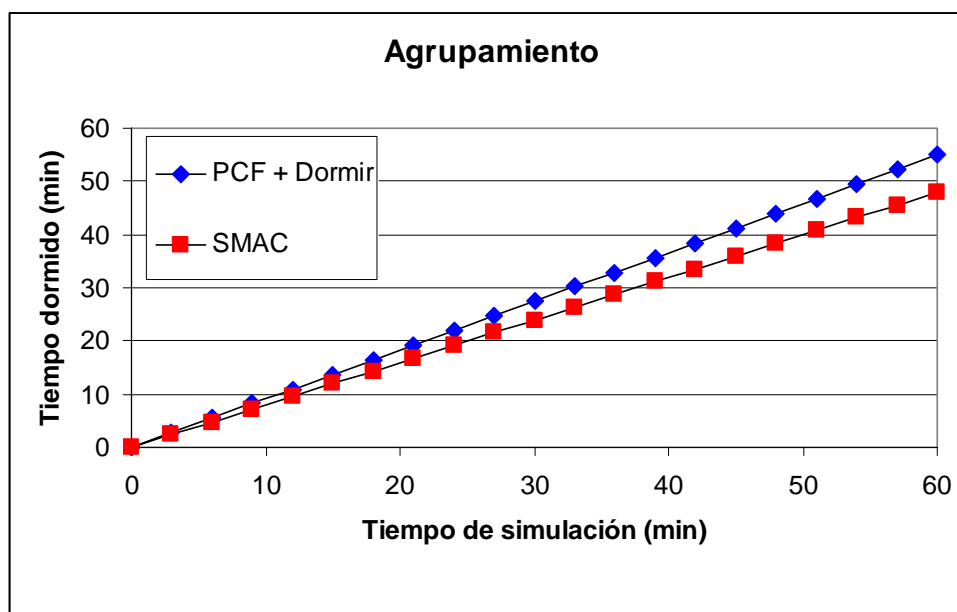


Figura 32 Gráfica del tiempo dormido del agrupamiento.

Tabla IX Tiempo dormido por nodo del agrupamiento

| | Tiempo dormido (min) | |
|---------|----------------------|------------|
| | PCF + Dormir | SMAC |
| Nodo 1 | 58.4067633 | 49.74625 |
| Nodo 2 | 56.907002 | 49.3566667 |
| Nodo 3 | 55.4074627 | 49.2575 |
| Nodo 4 | 53.9080515 | 49.66125 |
| Nodo 5 | 52.408839 | 49.8454167 |
| Nodo PC | 52.365396 | 39.92875 |

Como puede notarse en la tabla IX, el mayor tiempo dormido en todos los nodos incluyendo el nodo PC, sigue siendo el del modelo PCF + Dormir. Además, ahora ya con una simulación de una hora se ve claramente cómo es que el nodo PC del modelo propuesto duerme alrededor de 12 minutos más que el nodo del modelo SMAC.

La figura 33 muestra el comportamiento de ambos nodos PC en donde se ve cómo es que el nodo del modelo PCF + Dormir tiene mayor duración dormido que el de SMAC.

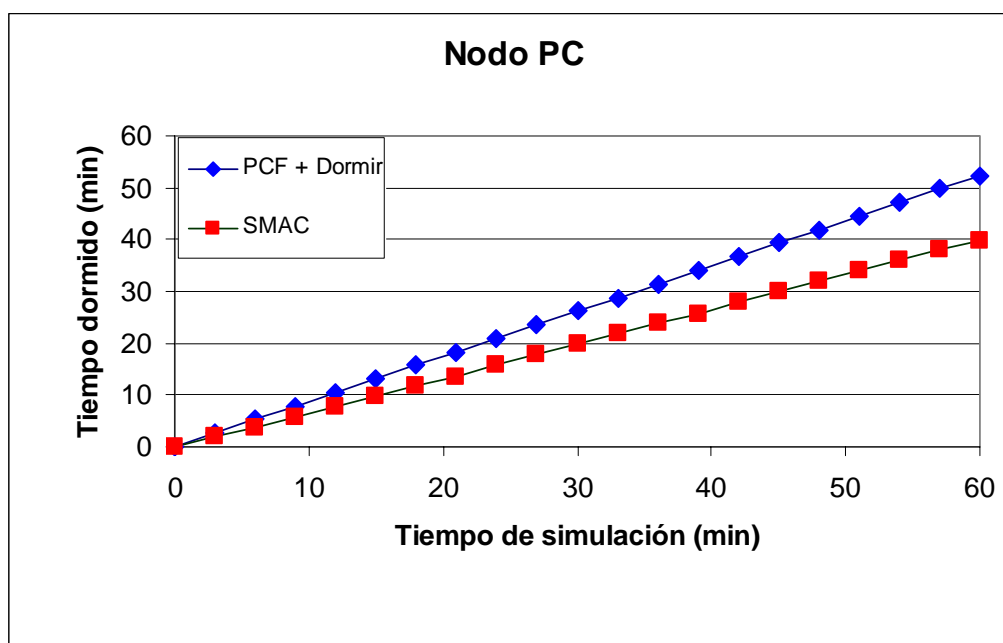


Figura 33 Gráfica del tiempo dormido del nodo PC.

V.3.2. Simulación del consumo de energía

Tiempo de simulación de 10 minutos

La tabla X muestra el consumo de energía por nodo, en ésta se puede apreciar que el menor consumo de energía lo tienen los nodos correspondientes al modelo PCF + Dormir comparándolos contra SMAC. Comparando los nodos PC podemos observar como el de SMAC consume alrededor del triple de energía que el de PCF + Dormir.

Tabla X Consumo de energía por nodo del agrupamiento.

| | Consumo de energía (J) | |
|---------|-------------------------------|-------------|
| | PCF + Dormir | SMAC |
| Nodo 1 | 1.129865 | 6.840763 |
| Nodo 2 | 2.097725 | 6.927306 |
| Nodo 3 | 3.064746 | 7.01313 |
| Nodo 4 | 4.032517 | 6.599104 |
| Nodo 5 | 4.999922 | 6.707854 |
| Nodo PC | 4.820339 | 13.897703 |

Tiempo de simulación de 1 hora

La figura 34 muestra la gráfica del consumo de energía del agrupamiento total con una simulación de 1 hora. En ella se puede apreciar cómo es menor el consumo de energía de nuestro modelo propuesto PCF + Dormir que el de SMAC. A continuación se muestra la tabla XI, en la cual se observa el consumo de energía por nodo.

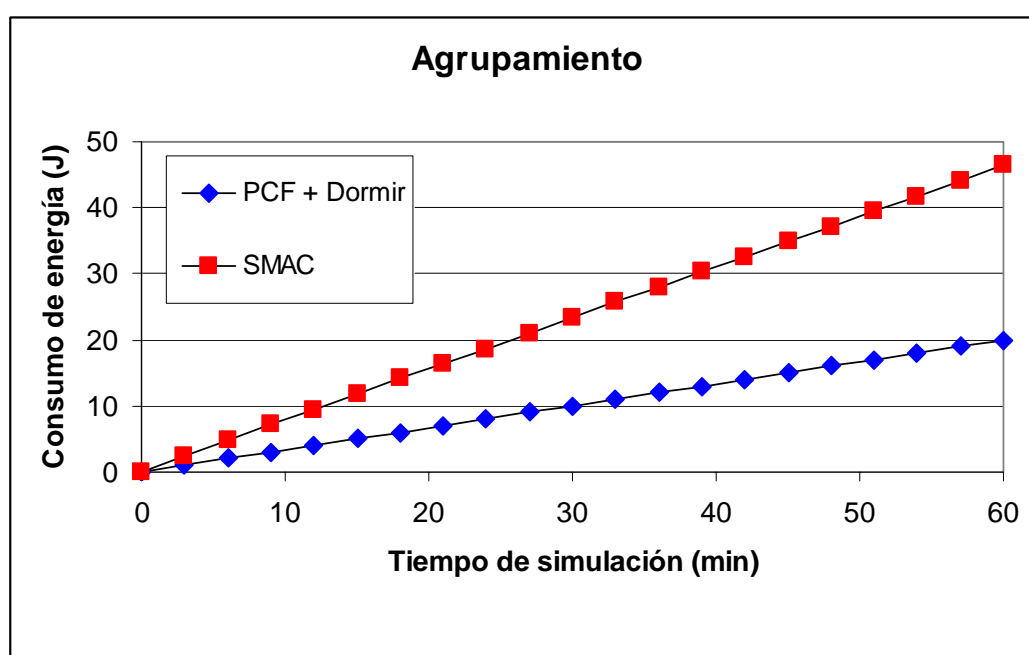


Figura 34 Gráfica del consumo de energía del agrupamiento.

Tabla XI Consumo de energía por nodo del agrupamiento.

| | Consumo de energía (J) | |
|---------|-------------------------------|-------------|
| | PCF + Dormir | SMAC |
| Nodo 1 | 6.619353 | 39.808219 |
| Nodo 2 | 12.429385 | 41.349056 |
| Nodo 3 | 18.238727 | 41.752225 |
| Nodo 4 | 24.047533 | 40.169937 |
| Nodo 5 | 29.855583 | 39.448295 |
| Nodo PC | 28.797648 | 76.231106 |

Como puede notarse en la tabla XI, el menor consumo de energía en todos los nodos incluyendo el nodo PC, sigue siendo el del modelo PCF + Dormir. Además ahora ya con una simulación de una hora, se vuelve a mostrar cómo es que el nodo PC del modelo propuesto consume menos de la tercera parte de la energía que el nodo PC del modelo SMAC.

La figura 35 muestra el comportamiento en cuanto a consumo de energía de los respectivos nodos número dos de los modelos, en esta figura se puede apreciar cómo es mayor el consumo de energía del modelo SMAC que del modelo PCF + Dormir.

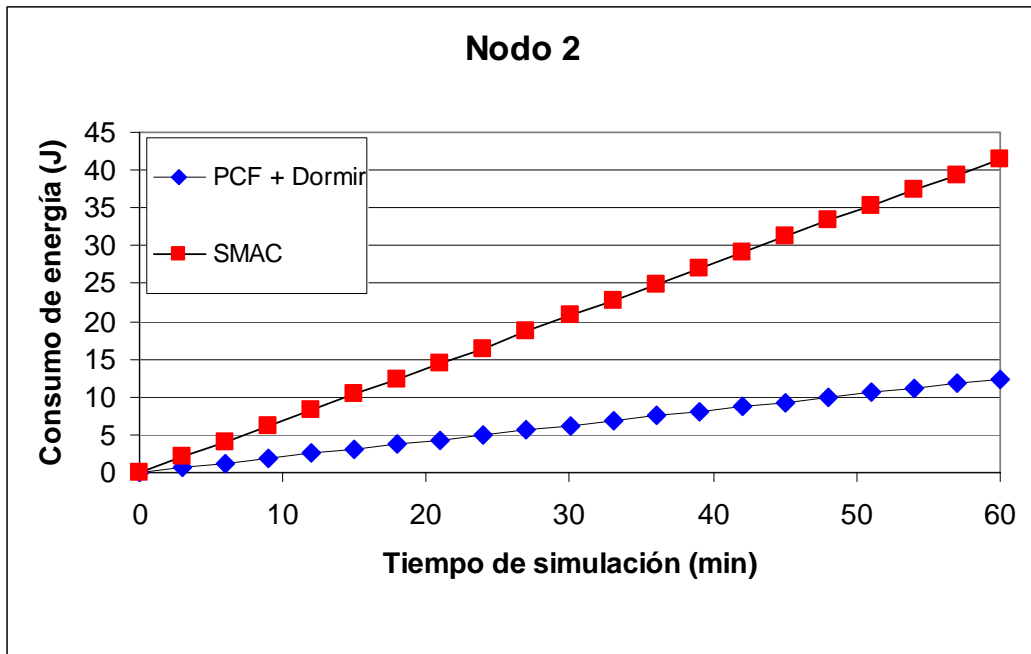


Figura 35 Gráfica del consumo de energía del nodo 2.

V.3.3. Simulación del retardo promedio

Tiempo de simulación de 1 hora

La figura 36 muestra la gráfica del retardo promedio del agrupamiento con una simulación de 1 hora. En ella se puede apreciar como ambos retardos se mantienen constantes, además el retardo en PCF + Dormir es menor que en SMAC, por lo que podemos decir que nuestro protocolo es mejor.

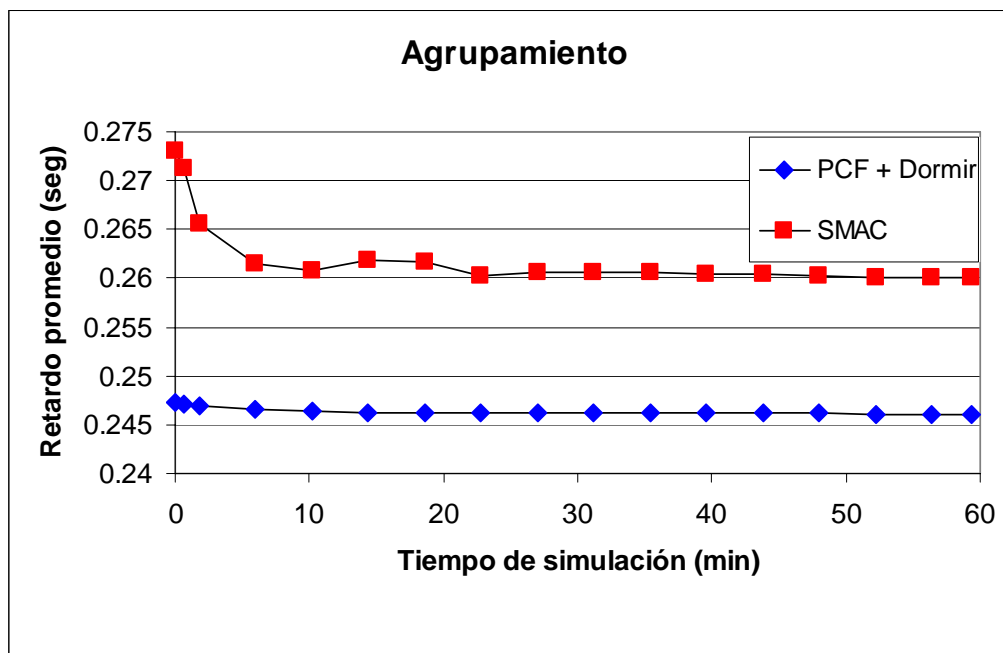


Figura 36 Gráfica del retardo promedio del agrupamiento.

Cabe mencionar que en todas las gráficas presentadas en este trabajo de tesis, los nodos tuvieron un comportamiento semejante, por lo que sólo se pone un nodo del agrupamiento en el entendido de que los demás nodos obtuvieron resultados muy parecidos.

VI. CONCLUSIONES

*Después de escalar una montaña muy alta, descubrimos
que hay muchas otras montañas por escalar.*

--Nelson Mandela

VI.1. Conclusiones

El trabajo desarrollado en esta tesis fue la implementación de un nuevo esquema de acceso al medio en el que los nodos vecinos que necesitan comunicarse directamente se coordinan de tal manera que ahorran energía mediante el apagado de su subsistema de comunicaciones durante los períodos en los que no tienen información por intercambiar. Este mecanismo de acceso al medio está basado en el protocolo PCF (función de coordinación puntual) descrito en el estándar de redes inalámbricas IEEE 802.11. Se

tomaron en cuenta también los requerimientos de calidad de servicio en el sentido de que la frecuencia con que se presentan las ventanas de actividad coordinada y el tamaño de las mismas son suficientes para la transmisión oportuna del tráfico que se está generando. La definición de estos parámetros se hace en colaboración con el protocolo de enrutamiento.

Como resultado de nuestro trabajo podemos decir que el nodo que más tiempo permaneció despierto y que por lo tanto fue el que consumió mayor energía fue el nodo Cluster Head, los demás nodos consumieron menor energía y se fueron desgastando poco a poco.

Se concluye también que nuestro modelo propuesto, llamado PCF + Dormir, presenta un considerable ahorro de energía de todos los nodos sobre el modelo SMAC, además de tener menor retardo promedio.

Por lo antes expuesto, se puede concluir que nuestro modelo propuesto llamado PCF + Dormir mejora al modelo SMAC.

Los resultados obtenidos a través de simulaciones fueron logrados mediante la utilización del simulador de redes llamado OPNET, el cual fue muy importante para la conclusión de dicho trabajo.

Cabe hacer mención de que este trabajo de tesis es parte de un proyecto más amplio, el cual define protocolos para redes de sensores que toman en cuenta QoS y eficiencia de energía.

El proyecto en conjunto consta de 3 trabajos de tesis de maestría que se realizaron simultáneamente.

VI.2. Trabajo futuro

Este trabajo de tesis presenta la investigación en redes de sensores sobre cómo hacer el tiempo de vida de la red mayor tomando en cuenta requerimientos de calidad de servicio.

Investigación futura sobre este trabajo podría ser la implementación de nuestro modelo PCF + Dormir dentro de dispositivos reales (motes) de manera que se pueda comparar el funcionamiento del protocolo de forma física y simulada.

Además, como se mencionó anteriormente, existen otros dos trabajos de tesis a la par de éste relacionados con redes de sensores, de manera que como otra posible investigación sobre trabajo futuro podría ser la unión de las tres tesis, con lo que se tendría finalmente un protocolo cross-layer para el descubrimiento de topología, con selección de ruta y reservación, y mecanismos de control de acceso al medio para una red inalámbrica de sensores. Aunado a esto se podría también implementar de manera física en un mote y estudiar su comportamiento.

REFERENCIAS

IEEE. 1999. **“Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications”**. ANSI/IEEE Standard 802.11.

IEEE, Inc. 2003. **“Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)”**. IEEE Std. 802.15.4, New York.

Brownfield M., Fayez A. y Nathaniel D. 2005. **“Wireless Sensor Network Radio Power Management”**. <http://www.opnet.com>. Consultado en febrero de 2006.

Clausen T. y Jacquet P. 2003. **“Optimized Link State Routing Protocol”**. IETF RFC 3626. <http://www.faqs.org/rfcs/rfc3626.html>. Consultado en octubre de 2005.

Daemen J. y Rijmen V. 2002. **“AES submission documento n Rijndael”**. Versión 2.

Dong Y. y Makrakis D. En proceso. **“Effective Bandwidth Calculation for QoS Routing in IEEE 802.11 DCF Ad hoc Networks”**. Por aparecer en: Ad Hoc & Sensor Wireless Networks.

Fawal A., Le Boudec J., Merz R., Radunovic B., Widmer J. y Maggio G. 2005. **“Trade-off Analysis of PHY-Aware MAC in Low-Rate Low-Power UWB Networks”**. IEEE Communications Magazine. 43 (12): 147-155 p.

Ilyas M. y Mahgoub I. 2005. **“Handbook of Sensor Networks: Compact Wireless and Wired Sensing Systems”**. CRC Press LLC, Boca Raton, 775 p.

Jung E. y Vaidya N. 2002. **“An energy efficient MAC protocol for wireless LANs”**. IEEE INFOCOM'02, New York. P 1-11.

REFERENCIAS (CONTINUACIÓN)

Li Y., Ye W. y Heidemann J. 2005. **“Energy and Latency control in Low Duty Cycle MAC Protocols”**. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), New Orleans, LA. P 1-7.

Mayné J. 2004. **“IEEE 802.15.4 y Zigbee”**. http://www.bairesrobotics.com.ar/data/IEEE_ZIGBEE_SILICA.pdf. Consultado en agosto de 2005.

Medina Castro P. 2004. **“Introducción de mecanismos de calidad de servicio en el protocolo de acceso al medio de redes locales inalámbricas del tipo IEEE 802.11”**. Tesis de maestría en ciencias, CICESE. Ensenada, México. 114 p.

Meza Mújica M. 2003. **“Introducción de diferenciación de servicios en el protocolo de acceso al medio de redes locales inalámbricas del tipo IEEE 802.11”**. Tesis de maestría en ciencias, CICESE. Ensenada, México. 126 p.

Molina López R. En proceso. **“Protocolos de enrutamiento para redes de sensores que tengan en cuenta requerimientos de calidad de servicio y que a la vez sean eficientes en el consumo de energía”**. Tesis de maestría en ciencias en proceso, CICESE. Ensenada, México.

Poon E. y Li B. En proceso. **“SmartNode: Achieving 802.11 MAC interoperability in power-efficient Ad Hoc networks with dynamic range adjustments”**. En: Proceedings of the IEEE International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS), Providence, Rhode Island, USA. Sometido para publicación.

Raisinghani V.T., y Iyer S. 2006. **“Cross-layer feedback architecture for mobile device protocol stacks”**. IEEE Communications Magazine. 44 (1): 85-92 p.

Ruiz Ibarra J. 2006. **“Protocolo de control de acceso al medio (MAC) basado en TDMA que proporcione calidad de servicio y que a la vez sea eficiente en el consumo de energía, aplicable a redes de sensores”**. Tesis de maestría en ciencias, CICESE. Ensenada, México. 181 p.

REFERENCIAS (CONTINUACIÓN)

Singh S. y Raghavendra C.S. 1998. **“PAMAS: Power Aware Multi-Access protocol with Signaling for Ad Hoc Networks”**. ACM Computer Communications. 28 (3): 5-26 p.

Song G. y Li Y. Diciembre de 2005. **“Utility-Based Resource Allocation and Scheduling in OFDM-Based Wireless Broadband Networks”**. IEEE Communications Magazine. 43 (12): 127-134 p.

Srivastava V. y Motani M. Diciembre de 2005. **“Cross-Layer Design: A Survey and the Road Ahead”**. IEEE Communications Magazine. 43 (12): 112-119 p.

Tseng C., Yen L., Chang C. y Hsu K. 2005. **“Topology-Aided Cross-Layer Fast Handoff Desing for IEEE 802.11/Mobile IP Environments”**. IEEE Communications Magazine. 43 (12): 156-163 p.

Winter R., Schiller J., Nikaein N., y Bonnet C. 2006. **“CrossTalk: cross-layer decision support based on global knowledge”**. IEEE Communications Magazine. 44 (1): 93-99 p.

Woo A. y Culler D. En proceso. **“A transmission control scheme for media access in sensor networks”**. En: Proceedings of 7th ACM/IEEE Annual Conference on Mobile Computing and Networks (MobiCOM01), Rome, Italy. Sometido para aprobación.

Ye W., Heidemann J. y Estrin D. 2002. **“An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks”**. IEEE INFOCOM, New York City, NY. 3: 1567-1576 p.

Younis M. y Nadeem T. En proceso. **“Energy Efficient MAC Protocols for wireless sensor networks”**. En: Wireless Ad-Hoc and Sensor Networks, Ed. Ahmed Safwat, Kluwer Academic Publishers (por aparecer).

Zhang X., Tang J., Chen H., Ci S. y Guizani. 2006. **“Cross-layer-based modeling for quality of service guarantees in mobile wireless networks”**. IEEE Communications Magazine. 44 (1): 100-106 p.