

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA ENSENADA

MECANISMO DE HAND-OFF PARA
REDES INALÁMBRICAS DE SENSORES

Tesis que para obtener el grado de

Maestro en Ingeniería

Presenta

José Rafael Muñoz Ortiz

Director de la Tesis: Dr. Juan Iván Nieto Hipólito.



Dr. Juan Iván Nieto Hipólito

Director de Tesis



M.C. Elitania Jiménez García

Miembro del Comité



M.C. Carlos Gómez Agis

Miembro del Comité

Ensenada B.C. Noviembre 2008

RESUMEN

En este trabajo de tesis se presentará la propuesta de implementar un mecanismo de Hand-Off para Redes de Inalámbricas de Sensores (WSN, por sus siglas en inglés). Actualmente, existe el estándar 802.15.4 que cubre las necesidades de dicha tecnología. Este estándar es el IEEE 802.15.4, el cual maneja la capa física y capa de enlace de datos (capa 1 y capa 2 del modelo de referencia OSI).

A la par del estándar, surge la alianza ZigBee, la cual parte de los dos niveles de programación del estándar IEEE 802.15.4, agregando una tercera capa que es la de red, la principal desventaja de utilizar esta pila de protocolos, es que se requiere de ser socio de la alianza.

Sin embargo, el programar una tercera capa (capa de red) o hasta una cuarta capa (transporte), sin contar la capa de aplicación, implica el utilizar aun mas los limitados recursos de procesamiento y almacenamiento de los nodos sensores, es por este motivo que se propone un mecanismo de Hand-Off para las WSN en esta tesis.

El mecanismo de Hand-Off se implementara en la capa 2 de las WSN, esto por que la capa de enlace de datos es la mas próxima a la capa de aplicación en las WSN (sin contar la capa de red y la capa de transporte).

En el transcurso de esta tesis, se presentará un estado del arte del estándar IEEE 802.15.4, ZigBee Alliance y de las propuestas de protocolos más famosas en la literatura. También se presentara la propuesta del mecanismo de Hand-Off implementado en las WSN, así como el puente realizado entre la tecnología 802.11 y 802.15.4 para aumentar el área de cobertura de la red y por ultimo los resultados obtenidos por las mediciones realizadas al mecanismo de Hand-Off propuesto.

Agradecimientos

Agradezco a mis padres Myrna Ortiz Duarte y Rafael Muñoz Garcia por su apoyo y comprensión, así como también a mis hermanos Javier y Adriana, a mis abuelos, tios y demás familiares.

Un agradecimiento muy especial a mi novia Lilia Torres Rodríguez por ayudarme y aconsejarme en todo momento.

Agradezco a mi director de tesis, Dr. Juan Iván Nieto Hipólito la guía, asesoría y la oportunidad que me dio al formar parte de su grupo de investigadores, con lo cual fue posible desarrollar el presente proyecto de tesis doctoral.

De la misma forma, también quiero hacer patente mi deuda y agradecimientos a la M.C. Elitania Jiménez García y al M.C. Carlos Gómez Agis quienes invirtieron su valioso tiempo en revisar el documento final.

De una manera muy especial, agradezco al Dr. José Antonio Michel Macarty y al M.C. Humberto Cervantes los consejos y recomendaciones que me dieron para poder elaborar este trabajo, así como también sus correcciones en mi trabajo.

Agradezco con mucha emoción a la Universidad Autónoma de Baja California, escuela en donde realice mi licenciatura y postgrado, por la oportunidad que me ha dado de cumplir con mi sueño de tener una especialización y de impartir clases a las nuevas generaciones de Ingenieros.

De igual manera, agradezco a mis amigos Carlos y José Angel, Eduardo, Jaime, Irvin, Guillermo y Alonso, y a mis compañeros de Maestría Hector, Mónica, Edith, Norma por su apoyo y compañía.

JOSÉ RAFAEL MUÑOZ ORTIZ

Índice general

1. Introducción	8
1.1. Redes de Sensores Inalámbricos	8
1.2. Planteamiento del Problema	10
1.2.1. Justificación	10
1.3. Antecedentes	11
1.4. Pregunta de Investigación	12
1.5. Objetivos	12
1.5.1. Objetivo General	12
1.5.2. Objetivo Específico	12
1.6. Metas	13
1.7. Limitación del Estudio	13
2. Estado del Arte	14
2.1. Introducción	14
2.2. Aplicaciones de las WSN en Medicina	16
2.2.1. Beneficios	18
2.3. Protocolos MAC	18
2.4. ¿Por que no usar Protocolos MAC que ya Existen?	19
2.5. IEEE 802.15.4	22
2.6. ZigBee Alliance	25
2.7. Necesidad de Nuevos Protocolos MAC para WSN	27
2.8. Resumen	28

3. Métodos de Acceso diseñados para WSN	30
3.1. Introducción	30
3.2. Propiedades de las WSN	31
3.2.1. Factores que Ocasionan un Gasto de Energía Innecesario . . .	31
3.3. Secuencia RTS/CTS/DATA/ACK	32
3.4. S-MAC	33
3.4.1. Ventajas	35
3.4.2. Desventajas	35
3.5. LAS-MAC	35
3.5.1. Ventajas	36
3.5.2. Desventajas	37
3.6. WISEMAC	37
3.6.1. Ventajas	39
3.6.2. Desventajas	39
3.7. Otros Protocolos	40
3.7.1. T-MAC	40
3.7.2. DSMAC	40
3.8. Resumen	41
4. Hardware y Software Utilizado	43
4.1. Introducción	43
4.2. PAN802154	43
4.2.1. MCU	45
4.2.2. RF	46
4.3. Freescale Beekit	47
4.4. Simple MAC (SMAC)	47
4.5. BeeStack	51
4.6. CodeWarrior	52

4.7. Resumen	52
5. Mecanismo de HAND-OFF Propuesto	53
5.1. Introducción	53
5.2. Hand-Off Basado en RSSI	55
5.3. Tipos de Hand-Off	55
5.3.1. Punto de Vista del Usuario	55
5.3.2. Punto de Vista de la Red	56
5.4. Aportación	56
5.5. Nueva trama en Simple-MAC	56
5.6. Celdas en WSN	59
5.7. Mecanismo de Hand-Off Propuesto	62
5.8. Resumen	65
6. Desarrollo de un Puente 802.11-802.15.4	71
6.1. Introducción	71
6.2. Seleccionando el puente	72
6.3. Interfaz	72
6.4. Funcionamiento del Puente 802.15.4-802.11	74
6.5. Resumen	77
7. Resultados	79
7.1. Introducción	79
7.2. Escenarios	81
7.3. Resultados	83
7.4. Análisis de los resultados	87
7.5. Resumen	88
8. Conclusiones Finales	90

Índice de figuras

1.1. Topología.	9
2.1. Pila de protocolos para las WSN	15
2.2. Topología de la MAC de IEEE802.15.4	24
2.3. Pila de protocolos del estándar IEEE802.15.4	25
2.4. Pila de protocolos de ZigBee	26
3.1. Periodo Sleep - Listening	31
3.2. Secuencia RTS/CTS/DATA/ACK	33
3.3. S-MAC	34
3.4. Comparación de LAS-MAC con S-MAC	36
3.5. S-MAC vs LAS-MAC	37
3.6. WISEMAC	38
3.7. T-MAC	40
3.8. DSMAC	41
4.1. Descripción del PAN	44
4.2. Diagrama a bloques del PAN802154HAR00	45
4.3. a) Pila de protocolos de las WSN, b) Simplificación de la pila	46
4.4. Diagrama de Flujo para la transmisión de información de Simple-MAC	48
4.5. Topología de Simple-MAC	49
4.6. Trama Simple-MAC	50
4.7. Topologías SMAC, MAC y BeeStack	51

5.1. Estructura típica de un edificio donde operara la herramienta diseñada, la distribución y estructura varia dependiendo del lugar	54
5.2. Hand-Off	54
5.3. Punto de vista del usuario. a) No existe tiempo de desconexión, b)Existe un tiempo de desconexión que depende de la separación en- tre celdas	57
5.4. Trama Propuesta	58
5.5. Estructura del campo de Control	59
5.6. a) Red Unicelular, b) Red Multicelular	60
5.7. Perdida de propagación de potencia contra la distancia en un Ambien- te Indoor	61
5.8. Perdida de propagación de potencia contra la distancia en un Ambien- te abierto	61
5.9. Mecanismo de Hand-Off	63
5.10. Probabilidad de que los nodos centrales no repitan el mismo número de ranura	66
5.11. Diagrama del nodo	67
5.12. Diagrama del nodo, continuación	68
5.13. Diagrama del coordinador	69
6.1. Convergencia de una red 802.15.4 y una red 802.11	73
6.2. Implementación del chat con el puente 802.15.4-802.11	74
6.3. a) Coordinador, b) Nodo Móvil, c) Estación Base	75
7.1. Topología del Experimento	82
7.2. Topología de medición de 0 a 8 metros de C1	82
7.3. Topología de medición del umbral de los 8 metros de C1 y C2	83
7.4. Envío de Broadcast, con Histéresis	84
7.5. Conexión a Coordinadores, con Histéresis	85

7.6. Selección de ranura por parte de los Coordinadores, con Histéresis . .	85
7.7. Envío de Broadcast, sin Histéresis	86
7.8. Conexión a Coordinadores, sin Histéresis	87
7.9. Selección de ranura por parte de los Coordinadores, sin Histéresis . .	88
8.1. a) Pila de protocolos de las WSN, b) Simplificación de la pila	91

Índice de tablas

2.1. Tarjeta de Red vs. PAN802154	20
3.1. Tabla Comparativa de Protocolos	39

Capítulo 1

Introducción

1.1. Redes de Sensores Inalámbricos

Una red de sensores inalámbrica (WSN, por sus siglas en inglés, Wireless Sensor Network), es una red de dispositivos con capacidad de procesamiento de cómputo, llamados nodos, que se encuentran equipados con uno o varios sensores capaces de recolectar información del medio ambiente y transmitirla a un repositorio llamada estación base. Una WSN está compuesta por una cantidad de sensores, que va desde los cientos a los miles (dependiendo de la aplicación). Los sensores que forman la red pueden estar desplegados en la misma zona geográfica o en distintas, y pueden abarcar una zona de observación que va desde unos metros cuadrados hasta kilómetros cuadrados. También pueden operar en ambientes intramuros o a la intemperie. La comunicación entre los nodos que forman la red es inalámbrica y, al igual que Wi-Fi y Bluetooth, trabajan en la frecuencia de los 2.4 GHz, con un ancho de banda de 80 MHz.

Las características principales de los nodos de las WSN son: capacidad de almacenamiento máximo de 128 Kbytes, cómputo de 8 bits con una velocidad de procesamiento máximo de 16 MHz y funcionan a base de baterías por lo que el suministro de energía es limitada. Estos recursos implican un reto para los desarrolladores de aplicaciones al contar con nodos que cuentan con características similares al equipo de cómputo de los años 70's.

Las WSN en la actualidad se utilizan en aplicaciones tales como: medicina

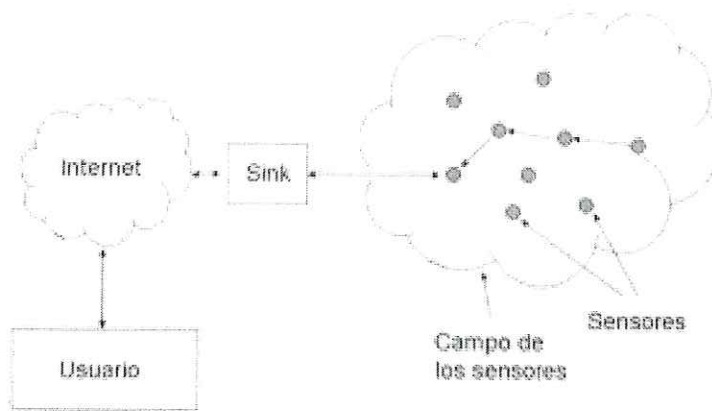


Figura 1.1: Topología.

(Monitoreo de pacientes, asistencia a discapacitados), implementaciones en el hogar (Domótica), industrial, monitoreo de medio ambiente y fauna.

Una red de sensores funciona como se muestra en la figura 1.1. La función de los nodos sensores es obtener información de la variable bajo observación, encaminar dicha información por medio de los demás nodos y hacer llegar esta información a una estación base (Sink), la cual se encarga de capturar toda la información recopilada de los nodos sensores. De esta forma la función principal de la estación base es hacer llegar la información recopilada vía Internet, satelital o alguna otra vía hacia una interfaz de usuario. Por esta razón, a la estación base también se le conoce como nodo coordinador.

A lo largo de esta tesis se utilizara como sinónimo estación base, nodo coordinador, o simplemente coordinador. También se utilizara como sinónimo nodo, nodo sensor, nodo móvil o simplemente sensor.

La WSN están reguladas por el estándar IEEE 802.15.4, y al igual que todos los estándares 802.x, únicamente se definen las capas física y enlace de datos (Capa 1 y 2 del modelo de referencia OSI). De la capa 3 a la 7 no se definen y se dejan libres a los requerimientos de la aplicación. Con la definición de la capa 1 y 2 solamente se pueden crear WSN de área local o uncelulares.

Paralelo al estándar 802.15.4 se formó la alianza ZigBee. ZigBee es una alianza de compañías dedicadas a promover la utilización de su pila de protocolos, su objetivo es que las WSN sean de uso común y de fácil y rápida implementación

ZigBee [14], a diferencia de IEEE 802.15.4, ZigBee implementa la capa de red (capa 3), en la que cuenta con mecanismos de enrutamiento de la información. La existencia de la capa 3 en ZigBee habilita la creación de WSN de cobertura amplia o multicelulares.

1.2. Planteamiento del Problema

Una red de área local o unicelular es aquella en la que su área geográfica se limita al alcance que pueda soportar el medio físico de comunicación cuenta. En el caso de las WSN la cobertura se limita a la potencia a la que puede transmitir el nodo transmisor y a la señal mínima que puede discernir en nodo receptor. En el caso de las WSN bajo el estándar 802.15.4 el área de cobertura esta limitada a un diámetro de 100 metros en ambientes exteriores. Esta área de cobertura se reduce significativamente en ambientes interiores o dentro de edificios.

Con este escenario, para poder cubrir espacios de varios cientos de metros o tener cobertura IEEE 802.15.4 dentro de un edificio se tendría que habilitar varias celdas y los mecanismos de comunicación entre celdas. Estos mecanismos de comunicación interceldas tendrían que estar alojados en dispositivos con capacidad de procesamiento equivalentes a una PC portátil, lo cual seria una opción costosa, teniendo en cuenta que un nodo sensor cuesta alrededor de \$15 dólares y un portátil alrededor de \$1000 dolares.

1.2.1. Justificación

Para extender el área de cobertura de las WSN bajo el estándar 802.15.4, es necesario implementar un mecanismo de transferencia de celda mas conocido como Hand-Off o protocolos de enrutamiento. La desventaja de utilizar protocolos de en-

rutamiento en los nodos 802.15.4 es el consumo de recursos para este propósito, dejando menos recursos para el desarrollo de la aplicación. Por esta razón en este trabajo de tesis se implementa un mecanismo de Hand-Off para extender el área de cobertura de las WSN.

El mecanismo de Hand-Off presentado es ligero y además abarca funciones de la capa de aplicación, optimizando los recursos del nodo sensor utilizado.

1.3. Antecedentes

Las redes de sensores inalámbricas tienen pocos años de su surgimiento, tan solo en el 2003 fue la primera versión liberada del estándar por el grupo de trabajo de la IEEE 802.15.4.

Después del anuncio de la primera versión del estándar, la alianza ZigBee aprobó su propia revisión en el 2004, ésta toma las mismas ideologías del estándar de la IEEE agregando también una capa de Red, con la diferencia que sólo se encuentra disponible para uso de los miembros de la alianza.

Pasaron 3 años para que la IEEE liberara la segunda versión del estándar para las WSN.

A la par de ZigBee Alliance y la IEEE, investigadores de estas tecnologías fueron aportando sus propios mecanismos de acceso al medio para las WSN. Esto debido a que el estándar no cubría las necesidades de los mismos investigadores para el desarrollo de sus aplicaciones, tal es el caso de Wey Ye [3], que desarrolló en el 2004 el método de Acceso S-MAC. Este método de acceso fue uno de los pioneros y más referenciado en la literatura, debido a su ideología de darles menor tiempo en los ciclos de trabajo de los sensores para eficientizar el tiempo de vida de la batería.

Muchos autores se basaron en la idea de S-MAC para hacer sus propios protocolos de acceso al medio, otros tantos simplemente realizaron mejoras a S-MAC y las publicaron.

A la fecha, en la literatura, existen protocolos de acceso al medio desarrollados

exclusivamente para WSN que se pueden considerar base para el desarrollo de nuevas propuestas. Estos protocolos de acceso para las WSN base son los que se estudiarán en este trabajo. De los métodos de acceso desarrollados exclusivamente para las WSN unos se han implementado y otros se han simulado.

Como se menciono anteriormente, el estándar IEEE 802.15.4 solo abarca hasta la capa de enlace de datos, lo cual limita el área de cobertura o de trabajo a una WSN unicolor. De aquí que para extender el área de trabajo es necesario ejecutar protocolos de enrutamiento o mecanismos de Hand-Off como en el caso de la telefonía celular.

1.4. Pregunta de Investigación

Se puede ampliar el área de cobertura o de trabajo de una WSN mediante mecanismos de Hand-Off que operen en la capa enlace de datos sin que sea intrusivo o consuma demasiados recursos de un nodo sensor?

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Diseñar un mecanismo de transferencia de celda (Hand-Off) que no sea intrusivo, y sea eficiente al momento de seleccionar el coordinador más cercano e incorporarlo en el protocolo de acceso al medio más apropiado.

1.5.2. Objetivo Específico

Para cumplir con el objetivo general, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Investigar los diferentes tipos de protocolos de acceso al medio que existen para las redes de sensores.
- Hacer un análisis de los protocolos más relevantes para realizar un estudio del estado del arte.

- Implementar el protocolo de acceso al medio más adecuado para nuestra aplicación.
- Diseñar un mecanismo de Hand-Off que no sea intrusivo y que pueda ejecutarse en el hardware utilizado.
- Agregar un mecanismo de Hand-Off al protocolo de acceso al medio elegido.

1.6. Metas

- Tener un mecanismo de Hand-Off lo suficientemente estable.
- Evaluar el mecanismo de Hand-Off implementado.

1.7. Limitación del Estudio

En este trabajo nos limitaremos a implementar el protocolo de acceso al medio más apropiado para nuestra aplicación, para así agregarle un mecanismo de Hand-Off y en base a esta mejora se realizarán mediciones en su desempeño.

Capítulo 2

Estado del Arte

2.1. Introducción

Este trabajo de tesis esta enfocado a las redes de comunicaciones, particularmente en redes inalámbricas de sensores (WSN). Siguiendo el modelo de referencia OSI, las WSN solo manejan las capas 1, 2, 3, 4 y 7 del modelo OSI, como se ve en la figura 2.1

En general una red de comunicaciones consta de nodos que pueden ser computadoras, impresoras, o cualquier dispositivo con capacidades de procesamiento y que cuente con una interfaz de comunicación, un canal de comunicación y protocolos o métodos que rigen el flujo de datos y las aplicaciones que la red provee. En este contexto, una WSN se constituye de nodos sensores con capacidad de medir variables físicas, procesarlas y transmitir la información recolectada o procesada vía un canal de comunicación inalámbrico a los otros nodos que forman la red, o a un nodo específico llamado nodo coordinador, nodo Sink o estación base. En otras palabras, una WSN se puede definir como un conjunto de nodos sensores que tienen la tarea de obtener información de las variables de observación, dependiendo de la aplicación.

Una WSN puede operar de manera punto-a-punto o topología en estrella. Una topología punto-a-punto los nodos que forman la red se comunican directamente uno con otro sin necesidad de pasar por nodos intermedios. En la topología en estrella la WSN debe tener por lo menos un coordinador que se encargue de administrar a los demás nodos, en una red de sensores puede existir varios coordinadores, y cada uno



Figura 2.1: Pila de protocolos para las WSN

de ellos se encargará de administrar a los nodos que se encuentren conectados a dicho coordinador, y éstos a su vez se comunicarán a una estación base.

Las características que distinguen a las WSN de las redes tradicionales son:

- Los nodos son pequeños, menos de 2x5 cm. de área.
- Nodos de bajo costo, alrededor de \$15 dólares o menos.
- Los nodos operan a base de batería, usualmente dos pilas AA.
- Nodos portables y embebidos dentro del sistema bajo observación.
- Debido al bajo costo y que operan a base de baterías, los nodos se consideran desechables.
- La capacidad de procesamiento de los nodos esta muy por debajo de una PC normal.
- La memoria disponible en los nodos para aplicaciones es de 64 a 128 Kbytes.

- La WSN tienen topología cambiante.
- Las WSN constan de un nodo coordinador y varios nodos sensores por cada celda.
- Los coordinadores pueden tener energía ilimitada, esto debido a que pueden conectarse directamente a la corriente sin la necesidad de utilizar pilas.
- Los nodos cuentan con los estados de transmisión, recepción, espera o hibernación.

2.2. Aplicaciones de las WSN en Medicina

Las aplicaciones de las WSN puede variar dependiendo las necesidades, desde la adquisición de temperatura del medio ambiente, hasta aplicaciones en domótica.

Algunos ejemplos generales se listan a continuación:

- Control y monitoreo del medio ambiente, tanto humedad como temperatura.
- Control en habitaciones (luz, agua, temperatura).
- Control de parámetros en invernaderos o criaderos.
- Detección de desastres naturales.
- Asistencia civil (Movimiento peatonal, información turística, etc).
- Milicia (localización de soldados).
- Inventario.
- Medicina.
- Etc.

Como ejemplo de aplicaciones específicas están el monitoréo de personas mayores con demencia [17]. Esta aplicación consiste en colocar sensores en diferentes áreas de la casa, y otro en la misma persona, de manera que cuando ésta esté cerca del lugares que pudiera ser peligrosos, se realicen acciones que alerten al personal de asistencia.

Otra de las aplicaciones es en telemedicina [18], cuando se da de alta a algún paciente de un hospital, estos pueden ser monitorizados directamente desde su casa, a través de sensores de presión arterial, frecuencia cardíaca, colocados en el paciente. De este modo, al detectar un cambio irregular en su condición se tomaran las precauciones y acciones pertinentes para mantener la salud del paciente en buen estado.

La utilización de etiquetas RFID (Radio Frequency IDentification)[18] se incluye también en las aplicaciones de telemedicina, para la administración de personal y materia prima. Con la ayuda de esta tecnología, un doctor o enfermera puede con facilidad localizar determinado medicamento, para así ahorrar tiempo en una emergencia y tambien se puede localizar al personal cuando se requiera de sus servicios. Esto se logra con la colocación de pulseras con etiquetas RFID en las pulseras de los empleados, y mediante triangulación para poderlos localizar.

El usar pulseras con etiquetas RFID no solo va orientado a los empleados de un hospital, sino que también pueden ser colocadas a los pacientes. Cuando el paciente entre al consultorio, el médico inmediatamente escaneara la pulsera del paciente con una PDA, o algún otro dispositivo portátil, este dispositivo leerá el ID de la etiqueta e inmediatamente accederá a la base de datos para ver, tanto sus datos personales como su historial clínico. Esto lograra, entre otras cosas, la disminución del tiempo de espera de los pacientes, evitando la congestión en la sala de espera.

Estas son algunas de las aplicaciones que se pueden orientar a telemedicina, la aplicación depende del ingenio del diseñador y no tanto de las limitantes de los sensores, como se puede ver, los sensores son una herramienta tan poderosa que con el correcto uso, puede mejorar en demasía el servicio tanto de hospitales como centros de salud. Como un ejemplo real del uso de las Tecnología de la Información (TI) en

la telemedicina, se recomienda leer el proyecto Codeblue [42].

2.2.1. Beneficios

Algunos beneficios de utilizar WSN[21] en servicios médicos son los siguientes:

- Se puede realizar un diagnóstico más apropiado gracias al acceso inmediato que se tiene de la información de los pacientes, como por ejemplo, medicamentos que se le han suministrado y su historial clínico.
- Toda la información que se ha registrado se puede utilizar como historial clínico.
- Se puede reducir el tiempo de espera de los pacientes, debido a que se puede acceder a la información del paciente con rapidez.
- Se controla la evolución del paciente.
- Se puede prevenir oportunamente el riesgo de vida del paciente mediante las mediciones que se le hagan al mismo.
- Se tiene acceso a la información del paciente en el momento que se le requiera o cuando el médico lo desee.
- Se evitan los errores de obtención de información, causados por la manipulación de datos por parte del personal.

2.3. Protocolos MAC

Un protocolo MAC (Medium Access Control), o Protocolo de Acceso al Medio Físico, tiene como objetivo garantizar al nodo el acceso al canal de comunicaciones, para lo cual sigue ciertas reglas o convenios. Entre sus tareas están: direccionar los datos que serán transmitidos por el canal de comunicaciones, determinar que nodo transmitirá y en qué momento lo hará, detectar los errores de las tramas (paquetes)

que han sido enviadas, tomar decisiones (éstas dependen del protocolo utilizado) sobre qué hacer en caso de existir alguna colisión.

Sin un protocolo MAC implementado, existirían muchos errores y colisiones en las tramas, los nodos no sabrían en que momento transmitir y no sabrían a que nodo o estación va dirigida la información que se transmite.

Algunos de estos protocolos MAC[11][12] utilizados en las redes tradicionales, ya sea inalámbricas o alámbricas, son los siguientes.

- Aloha Puro.
- Aloha Ranurado.
- FDMA
- TDMA
- CDMA
- CSMA (y sus derivaciones)

Estos protocolos se utilizan en redes como Ethernet (CSMA/CD) que fue estandarizado en 1983 y Wi-Fi(CSMA/CA, TDMA), estandarizada en 1997. Estos protocolos se diseñaron pensando en dispositivos completamente diferentes a los utilizados en las WSN, por ejemplo, no operan con baterías, tienen capacidad de memoria y procesamiento mucho mayores que los nodos de las WSN y el costo de los nodos de las WSN son mucho menores que de los nodos Ethernet. Estas diferencias hacen necesario el diseño de protocolos que sean eficientes en cuanto al consumo de energía y tiempo de transmisión-recepción.

2.4. ¿Por que no usar Protocolos MAC que ya Existen?

Todos los protocolos MAC en general, tienen la gran ventaja de ser protocolos sólidos, pero a su vez, no pueden ser implementados en WSN debido a que los proto-

	Realtek*	PAN802154**
Micro	RTL8019AS	MC9S08GT60
RAM	16 K	4 K
ROM	4 M	60 k (Flash)

Tabla 2.1: Tarjeta de Red vs. PAN802154

colos antes mencionados requieren de maor capacidad de procesamiento y almacenamiento, por este motivo no pueden ser implementados en su totalidad en dichos sensores. Otro punto importante es, por ejemplo, el protocolo utilizado por las redes Ethernet se desarrollo considerando nodos estáticos, y el protocolo utilizado en redes Wi-Fi se desarrollo pensando en nodos semi-móviles para operar siempre en un área de cobertura limitada por un dispositivo central llamado Access Point (AP).

Como se menciono anteriormente, las limitantes de los nodos WSN ocasiona el crear un protocolo adecuados para sus características. En la tabla 2.1 se muestra la comparación entre un nodo 802.15.4 de Freescale y una tarjeta de red Ethernet (de la más común en el mercado):

*Nota: El modelo de la tarjeta es una Fast Ethernet PCI 10/100/1000 M (Realtek Full-Duplex Ethernet Controller with Plug and Play Function) [22]. **Nota: Se refiere al módulo de prueba de Panasonic [23] basado en el estándar 802.15.4.

Como se puede ver en la tabla 2.1, una tarjeta de red tiene mucha más memoria ROM que un módulo 802.15.4, es por este motivo que es prácticamente imposible de introducir un protocolo MAC tan complejo como CDMA, y con lo que respecta a la memoria RAM, una tarjeta de red tiene cuatro veces más RAM que el módulo de Panasonic, esto también limita el procesamiento del protocolo utilizado y de la aplicación. En las redes Ethernet y Wi-Fi, las tarjetas son completamente ajenas a la aplicación, cosa que no sucede en las WSN, donde el nodo debe ejecutar el protocolo de acceso, protocolo de enrutamiento (si es requerido), protocolo de transporte (si es requerido), más la aplicación.

Hay redes inalámbricas que tienen algunas similitudes con las WSN, pero a su

vez, cuentan con varias diferencias que impide su implementación en dichas redes[1]. Dichas tecnologías son las siguientes.

Sistemas celulares: estos sistemas, al igual que las WSN, tienen como prioridad en el protocolo MAC la calidad de servicio (QoS, por sus siglas en inglés, Quality of Service), por lo contrario, con lo que respecta a el consumo de energía, en los sistemas celulares lo tienen como algo secundario, debido a que la batería de éstos, puede ser cargada por el usuario cuando le sea requerido, siendo que para las WSN esto es algo prioritario, ya que, la batería de un sensor tiene un tiempo de vida limitada y esta energía debe de ser bien administrada. Esta es una de las principales razones por las que no se puede utilizar estos protocolos.

Bluetooth: Al igual que los sistemas celulares, y las WSN, tienen como prioridad la calidad de servicio, también tienen la característica de soportar hasta 8 dispositivos conectados (formando así una piconet) y su topología es cambiante al igual que los sistemas celulares y las WSN. En las WSN, 8 dispositivos en una sola red es muy poco, como se menciono, estas redes pueden tener desde cientos hasta miles de nodos en una pequeña área, y con lo que respecta a la topología cambiante, en las WSN puede haber más movimiento de los nodos que en las redes bluetooth.

El motivo principal, aparte de los mencionados anteriormente, es el consumo de energía que se requiere para implementar los protocolos de acceso de las redes tradicionales. En las WSN se debe de garantizar el menor consumo de energía en implementar el protocolo de acceso debido a que los nodos WSN operaran con baterías y no es rentable el reemplazar la batería a los nodos que lo requieran, ya que como se mencionó, en un área determinada podría haber hasta miles de nodos. Por consiguiente el primer factor que se debe de tomar en cuenta para el diseño de un protocolo en las WSN, es eficientizar el consumo de energía de los nodos [2], esto es para poder alargar el tiempo de vida de la red.

También se debe de tomar en cuenta la escalabilidad y adaptabilidad a los cambios. Tales como los cambios en el tamaño de la densidad de los nodos y los cambios

de topologías.

Otros factores, aunque secundarios, que se deben de tomar en cuenta, son la latencia, el caudal eficaz y el uso del ancho de banda.

Estos y más factores obligan a diseñadores de redes de sensores a realizar nuevos protocolos MAC que se adapten a las necesidades de la aplicación que quieren desarrollar.

Un nodo, ya sea de una red tradicional o de WSN, puede tener los siguientes estados: **Idle Listening**, en este estado, el nodo esta a la espera de un paquete. **Colisiones**, Si dos o más nodos desean acceder al medio a la vez, o cuando un nodo quiere acceder al medio cuando otro ya lo realizo, sucede una colisión y esto ocasiona la retransmisión de la información. **Overhead de los Paquetes de Control**, el consumo de energía para los paquetes de control es pequeño, pero para aplicaciones en redes de sensores, es significativo. **Overhearing**, Escuchar paquetes que son para otros nodos, ocasionan gasto de energía significativo. Cada uno de estos estados requiere de un consumo de energía que en las redes tradicionales no es un problema, ya que operan directamente a la corriente o con baterías con facilidad de recarga.

Esto provoca el diseño de nuevos protocolos de acceso al medio que minimizen el consumo de energía y diseñados considerando el hardware utilizados en los nodos WSN

2.5. IEEE 802.15.4

Este estándar define el protocolo de acceso al canal de comunicaciones y la interconexión de dispositivos vía radio en una red inalámbrica de área personal (WPAN) [19][20]. Este estándar utiliza TDMA/CSMA como método de acceso al medio y soporta tanto la topología en estrella como punto a punto. El acceso al medio está basado en contención.

Algunas de las características con las que cuenta este estándar se listaran a continuación:

- Taza de transmisión programable de 250 kb/s, 100 kb/s, 30 kb/s y 20 kb/s.
- Topología en estrella o punto a punto.
- Direccionamiento corto de 16 bits y extendido de 64 bits.
- CSMA/CA como acceso al canal.
- Bajo consumo de energía.
- Función detección de energía recibida (ED).
- Indicación de calidad del enlace (LQI).
- 16 canales en la banda de los 2450 MHz, 30 canales en la banda de los 915 MHz, y 3 canales en la banda de los 868 MHz. El utilizado en este trabajo de tesis trabaja en la banda de los 2450 MHz.

En 802.15.4 pueden existir dos tipos de dispositivos, que son:

- Dispositivo de Funcionalidad Completa (FFD): a estos se les conoce como nodos activos, estos pueden ser los enrutadores (Router) y los Coordinadores, éstos no tienen limitado el consumo de energía.
- Dispositivos de Funcionalidad Reducida (RFD): a estos se les conoce como nodos pasivos, estos siempre son los dispositivos finales y tienen el consumo de energía limitada, en otras palabras, básicamente se encargan de adquirir información del ambiente.

En una topología en estrella, como la que se muestra en la figura 2.2, la comunicación se establece entre un nodo RFD y un nodo controlador FDD, al que se le conoce como PAN Coordinator. El nodo RFD se encarga de la adquisición de información, y el PAN Coordinator se encarga de controlar la red y puede ser utilizado para

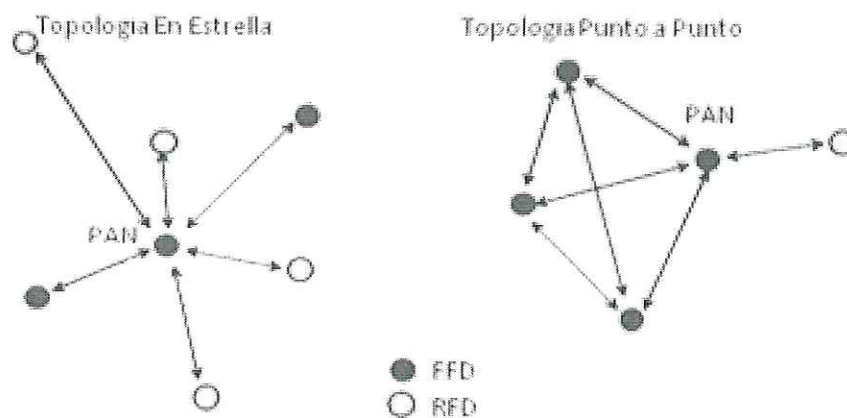


Figura 2.2: Topología de la MAC de IEEE802.15.4

iniciar, terminar o encaminar la comunicación a través de la red. Como característica principal de la topología en estrella, es que un dispositivo RFD no puede comunicarse directamente con otro dispositivo RFD, solamente se puede comunicar con el PAN Coordinator.

En una red WSN que opera en una topología en estrella su área de cobertura está limitada al alcance de detección de los nodos RFD al FDD. Esta área de trabajo en ambientes sin obstáculos, podría llegar a los 100 metros, que es la distancia que marca el estándar IEEE 802.15.4. Para ambientes dentro de edificios, el área de cobertura se reduce dependiendo de los obstáculos que exista entre el nodo RFD y el nodo FDD.

En una topología punto a punto, mostrada en la figura 2.2, los nodos RFD pueden comunicarse directamente entre ellos sin necesidad de pasar por un nodo FDD.

En una red WSN que opera con una topología punto a punto, el área de cobertura es mayor a una topología en estrella debido a que los nodos RFD pueden ser utilizados como puentes. Si este es el caso, se requerirá de un protocolo de enrutamiento que identifica las rutas que deberá tomar la información entre un par origen-destino.

La pila de protocolos del estándar IEEE 802.15.4 consiste solamente de dos capas como se muestra en la figura 2.3.

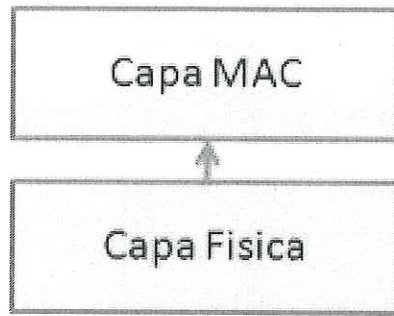


Figura 2.3: Pila de protocolos del estándar IEEE802.15.4

La capa 1, o capa física, es la encargada de establecer la conexión entre los nodos, en este caso, la conexión es vía radio en la banda de los 2.4 GHz dividida en 16 canales espaciados en 5 MHz cada uno. Por su parte, la capa 2, enlace de datos, se encarga en grandes rasgos del tipo de acceso al medio que se tendrá en la comunicación, detección y corrección de errores y del manejo de una trama de control con direcciones fuente destino.

Este estándar no es el único que existe, hay alianzas que pretenden estandarizar su propio producto y así adecuarlo a sus necesidades.

2.6. ZigBee Alliance

Esta alianza que esta formada por un conjunto de empresas reconocidas encargadas de difundir y promover la pila de protocolos ZigBee. ZigBee Alliance [14] toma el trabajo realizado por el estándar IEEE 802.15.4 en las capas física y MAC y a su vez agrega una tercera capa de red encargada del enrutamiento de la información, como el que se requeriría en una topología punto a punto. La pila de protocolos ZigBee se muestra en la figura 2.4.

La capa física y la capa de enlace de datos de la Alianza ZigBee, son similares a las definidas en el estándar 802.15.4, definidas anteriormente. La tercera capa incorporada en ZigBee, es la encargada de determinar las rutas o caminos por donde se transmitirá la información de los nodos. La incorporación de una tercera capa en la

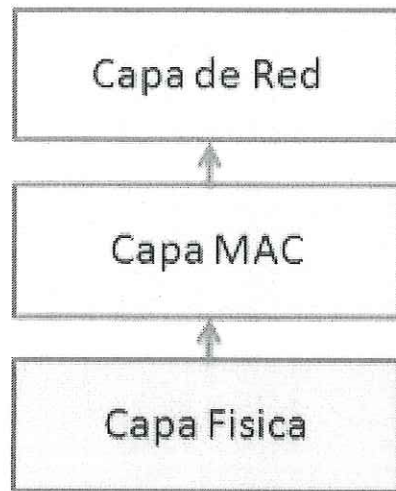


Figura 2.4: Pila de protocolos de ZigBee

pila de protocolos de ZigBee implica, el uso de un tercer dispositivo (nodo) en la red, el cual lleva el nombre de nodo router, además de los nodos coordinadores y los nodos sensores, indicados en el estándar 802.15.4.

A continuación se explica función de cada uno de estos dispositivos:

- Coordinador (ZigBee Coordinator, ZC). Este, es el dispositivo más completo. Debe existir uno por red. Sus funciones son las de encargarse de controlar la red y los caminos que deben seguir los dispositivos para conectarse entre ellos.
- Router (ZigBee Router, ZR). Interconecta dispositivos separados en la topología de la red, en otras palabras, se encarga de calcular la ruta que tendrá la transmisión de la información.
- Dispositivo final (ZigBee End Device, ZED). Posee la funcionalidad necesaria para comunicarse con su nodo padre (el coordinador o un router), pero no puede transmitir información destinada a otros dispositivos. De esta forma, este tipo de nodo puede estar dormido la mayor parte del tiempo, optimizando de esta manera el gasto de energía. Un ZED tiene requerimientos mínimos de memoria.

Haciendo una analogía con el estándar 802.15.4, un ZED sería el equivalente a

un nodo RFD, y un ZC seria el equivalente a un FFD. Los nodos ZR, no están definidos en el estándar 802.15.4. Con la existencia de estos nodos ZR las redes ZigBee podrían extender su área de cobertura indefinidamente.

En ZigBee pueden existir dos tipos de topologías, que son en estrella o punto a punto, la selección de la topología a utilizar, depende de la aplicación que se le quiera dar a la red.

En una topología en estrella, todos los nodos están coordinados por un Coordinador (ZC), el resto de los nodos pueden ser Routers (ZR) o nodos finales (ZED). El nodo ZC es el que indica a los nodos ZR o ZED el tiempo en el que pueden transmitir.

En una topología punto a punto los nodos compiten por el canal, siguiendo lo marcado por el protocolo de acceso al canal (CSMA/CA).

ZigBee establece tres posibilidades de acceso al medio:

- Mecanismo de Señalización (Beacons) para un establecimiento de topología en estrella.
- Mecanismo CSMA/CA para la topología punto a punto y conseguir así que ciertos nodos tengan prioridad.
- Mecanismo de contención que asegure un periodo de tiempo para cada dispositivo.

Una gran desventaja de ZigBee es que es estándar es muy hermético en el aspecto de la información, y para tener acceso a ella, se requiere ser socio de la alianza.

2.7. Necesidad de Nuevos Protocolos MAC para WSN

Existen aplicaciones para las WSN en las cuales no es necesario el implementar todas las características con las que cuenta el estándar 802.15.4 de la IEEE, o en su defecto, requieren de más características, por lo que surge la necesidad de nuevas

propuestas que se adapten a las necesidades de cada usuario, por ejemplo, para una aplicación punto a punto en la que cada nodo solo se utiliza como puente o repetidor, no es necesario el implementar por completo el estándar, por lo que puede diseñar un nuevo protocolo para la comunicación.

En la literatura existen muchas y variadas propuestas, de las cuales se puede seleccionar la más apropiada, de igual manera muchos de esos protocolos no están implementados, estos protocolos solo se encuentran simulados.

También existe la posibilidad de diseñar nuevos protocolos que se adapten mas a la aplicación que se quiera desarrollar, lo cual es el caso de esta tesis.

2.8. Resumen

En este capítulo se mostró la definición de un protocolo MAC, que es el encargado de determinar el tipo de acceso al medio para la comunicación de los nodos, estos mecanismos pueden ser basados en TDMA, FDMA, CSMA, Aloha, etc. Sin embargo, la implementación de un protocolo de estas características en las WSN, es prácticamente imposible, debido a las prestaciones del hardware con las que cuenta un nodo WSN.

Debido al gran éxito y a las previsiones de uso masivo en aplicaciones como la medicina, agricultura, domótica, entre otras, las WSN han sido estandarizadas por la IEEE con la nomenclatura 802.15.4, también conocidas como redes de baja velocidad y baja potencia, perteneciendo al grupo de las redes inalámbricas de área personal (WPAN). El estándar 802.15.4, sólo define la capa física y la de enlace de datos de acuerdo al modelo de referencia OSI. A la par de este estándar, surgió la alianza ZigBee, que es una organización encargada de difundir su propia pila de protocolos, anexando una tercera capa a la pila de protocolos, que es la de red. La capa de red es la encargada de seleccionar una ruta o camino para la transmisión de la información de los nodos. La principal desventaja de esta solución, es el acceso a la información de la implementación de estas pilas, ya que ZigBee Alliance solamente permite

el uso de su pila de protocolos a los asociados de la organización.

Debido a que el estándar 802.15.4 solo define las primeras dos capas del modelo de referencia OSI, se hace necesario incluir dentro de la programación del nodo la aplicación a desarrollar del mismo nodo móvil. La aplicación puede incluir su propio método de acceso y necesariamente protocolos de las capas superiores.

Capítulo 3

Métodos de Acceso diseñados para WSN

3.1. Introducción

En el capítulo anterior se mencionaron el estándar IEEE 802.15.4 y ZigBee Alliance, sin embargo, muchos investigadores han optado por diseñar su propio protocolo de acceso al medio. Uno de los principales factores que motiva el desarrollo de nuevos protocolos de acceso, es que el estándar no cubre las necesidades de aplicaciones específicas de las WSN o por que algunas aplicaciones no requieren de tantas características con las que cuenta el estándar IEEE 802.15.4 o la alianza ZigBee. Otra desventaja es que la pila de protocolos de ZigBee sólo está disponible para los socios o para quien pague los derechos de propiedad intelectual.

En la literatura existen varios protocolos de acceso al medio para las WSN que han sido diseñados para cubrir las necesidades de la aplicación. El diseño exclusivo de protocolos para WSN, data del año 2000 [1] a la fecha, recordando que la primera versión del estándar IEEE 802.15.4 se ratificó en julio del 2003.

Las propuestas de protocolos MAC para WSN están basados principalmente en el ahorro de energía, sin embargo, la diferencia de estos protocolos con el estándar, radica en que fueron diseñados como posibles soluciones a aplicaciones o plantear soluciones para optimizar sus limitaciones.

En una red tradicional, los nodos siempre se mantienen a la escucha del canal

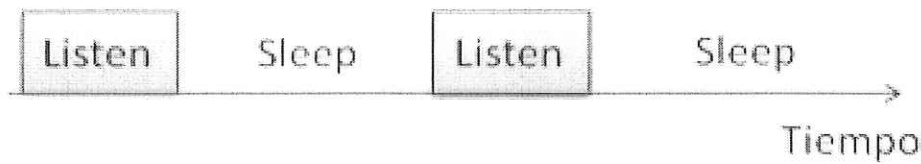


Figura 3.1: Periodo Sleep - Listening

(inalámbrico o alámbrico), esto implica un consumo de energía bastante grande. En las WSN, tener a los nodos en escucha permanente no es lo mas apropiado, ya que la energía de los nodos de las WSN esta limitada a dos baterías doble A.

Para reducir el gasto de energía en los nodos WSN, se ha optado por agregar un estado mas a los ciclos de trabajo de estos nodos. Este estado es llamado periodo de Sleep (dormido) y consiste en mantener dormido al nodo por un periodo de tiempo determinado por la aplicación, y asi disminuir el tiempo ocioso de los nodos WSN. Con este nuevo estado en general los nodos tendran en un ciclo de trabajo 2 estados: Sleep (dormido) y listening (transmitir/recibir), estos dos estados se muestran en la figura 3.1.

3.2. Propiedades de las WSN

Maximizar el tiempo de vida de las WSN es un objetivo general que tienen los investigadores de esta tecnología, esto se debe a que se asume que los nodos sensores "mueren" cuando la energía de la batería es consumida en su totalidad. Bajo estas circunstancias, las propuestas de protocolos MAC para las WSN se enfocan a reducir el gasto de energía de los nodos. El consumo de energía innecesario se debe a varios factores, estos se explican a continuación.

3.2.1. Factores que Ocasionan un Gasto de Energía Innecesario

Cuando el nodo recibe más de un paquete al mismo tiempo, estos paquetes terminan colisionando. Todos los paquetes que causan una colisión son descartados y re-

transmitidos, lo cual incrementa el consumo de energía. Otra característica que ocasiona un gasto de energía mayor es cuando un nodo escucha un paquete que no va dirigido hacia él, a este término se le llama 'overhearing'. También ocurre un gasto de energía innecesario por la escucha de paquetes de control (overhead). A consecuencia de esta característica.

Una causa que ocasiona un mayor consumo de energía, ocurre con la escucha ociosa de los nodos (idle listening), esto es, la escucha constante del canal de comunicación para recibir algún paquete transmitido.

La ultima razón del consumo de energía innecesario es cuando un nodo transmite un paquete a un nodo destino que no esta listo para recibir datos, a este término se le denomina 'overmitting'. En resumen un nodo puede desperdiciar energía por:

- Colisiones
- Overhearing
- Idle Listening
- Overmitting

A continuación se reseñan los métodos de acceso mas representativos diseñados exclusivamente para WSN.

3.3. Secuencia RTS/CTS/DATA/ACK

La secuencia RTS/CTS/DATA/ACK consiste en 4 pasos, el primero es en el envío de un paquete RTS(Request To Send, en español petición de envío) con el cual el nodo transmisor le avisa al nodo receptor que quiere transmitir un paquete, inmediatamente el transmisor responde con un paquete tipo CTS(Clear To Send, en español Listo para enviar) al receptor, avisándole que esta listo para recibir el paquete, después de esto, el transmisor le envía al receptor la información deseada(DATA), y

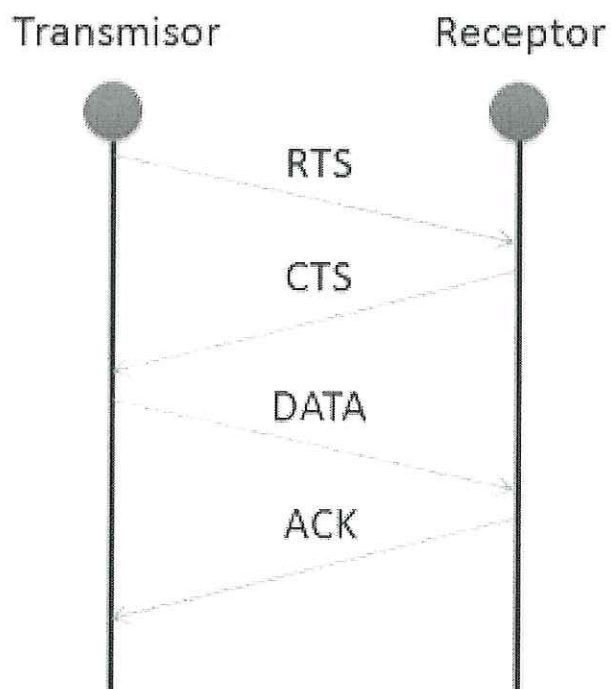


Figura 3.2: Secuencia RTS/CTS/DATA/ACK

por último, el receptor le envía un ACK donde le avisa al transmisor que el paquete o información llegó satisfactoriamente. Esta secuencia se puede ver con mayor detalle en la figura 3.2.

3.4. S-MAC

Este protocolo fue propuesto en 2002 [3] y es uno de los más mencionados y referenciados por diferentes trabajos realizados. La meta principal de este protocolo, es el menor gasto posible de energía.

La idea básica de S-MAC (Sensor MAC) es el manejo de un periodo sleep-listen calendarizado basado en una sincronización de los nodos. Los nodos vecinos forman un grupo virtual para poder calendarizar cuando deberá de hibernar el nodo. Si dos nodos vecinos se encuentran en dos grupos virtuales diferentes, ellos despertarán en el periodo de escucha de ambos grupos, es decir, los nodos pueden contar con más de

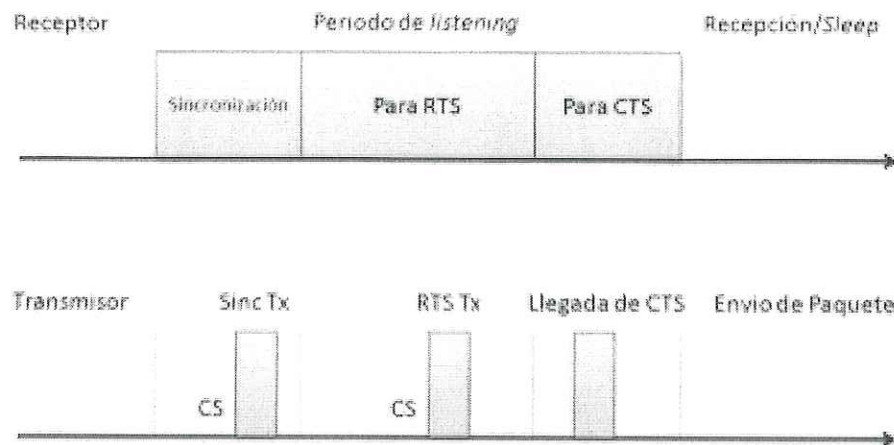


Figura 3.3: S-MAC

una calendarización. Esta característica implica un consumo mayor de energía, debido a la escucha ociosa de los nodos.

El intercambio de calendarizaciones, se logra durante el periodo de sincronía de los nodos vecinos (envío de paquetes tipo broadcast a los vecinos). La figura 3.3 representa un ejemplo de la comunicación transmisor-receptor. Las colisiones son evitadas por la escucha de la portadora, representada por CS (carrier sense) en la figura 3.3. Además, el intercambio de los paquetes RTS/CTS son usados para los paquetes tipo Unicast.

S-MAC también incluye el concepto de message passing, el cual divide un mensaje grande en varias tramas pequeñas para enviarlas en ráfagas. Con este concepto, los nodos ahorran energía por congestiones en la comunicación.

El periodo de sleep puede ocasionar latencia, especialmente en una topología donde existan saltos múltiples entre los nodos. Para solucionar este problema, se propone en S-MAC la técnica Adaptive Listening, esta técnica consiste en que el nodo despierte por un periodo corto de tiempo despues de haber terminado una transmisión, de esta forma, si este mismo nodo es el siguiente salto de un nodo vecino, recibirá la información y posteriormente pasará al periodo de sleep.

S-MAC, es uno de los pocos protocolos que ha sido simulado e implementado, la simulación fue realizada en NS2 y posteriormente implementado.

3.4.1. Ventajas

Este protocolo ahorra de manera significativa el consumo de energía principalmente por la introducción del periodo de sleep, además de que su técnica de sincronización es muy eficiente.

3.4.2. Desventajas

Si bien implementan la técnica de Message Passing para disminuir la latencia, esta tiene un valor muy significativo en comparación con otros protocolos. El periodo de Sleep-Listen es constante (los ciclos de trabajo son fijos) por lo tanto esto hace que la eficiencia del algoritmo se decremente cuando se habla de un tráfico que varía mucho.

3.5. LAS-MAC

Este protocolo fue propuesto en el 2006 [4], este protocolo es principalmente una mejora de S-MAC. Su estudio y evaluación la desarrollaron haciendo una comparativa del rendimiento del S-MAC contra LAS-MAC.

A diferencia del protocolo anterior, solamente fue simulado y comparado con S-MAC, la simulación fue realizada en NS2, y no se llevo a la etapa de implementación.

Tiene como finalidad el disminuir el gasto de energía (al igual que S-MAC) pero disminuyendo a su vez la latencia, ya que al tratar de disminuir el consumo de energía (en las WSN) la latencia aumenta de manera considerable.

La idea básica de este protocolo es aprovechar el periodo de sleep para transmitir paquetes, es decir, si un nodo desea transmitir, utiliza el tiempo de listen para contender por el medio para después, en el periodo de sleep transmitir la información, si el nodo no desea transmitir, entonces utiliza el periodo de sleep para hibernar (al igual que S-MAC), figura 3.4.

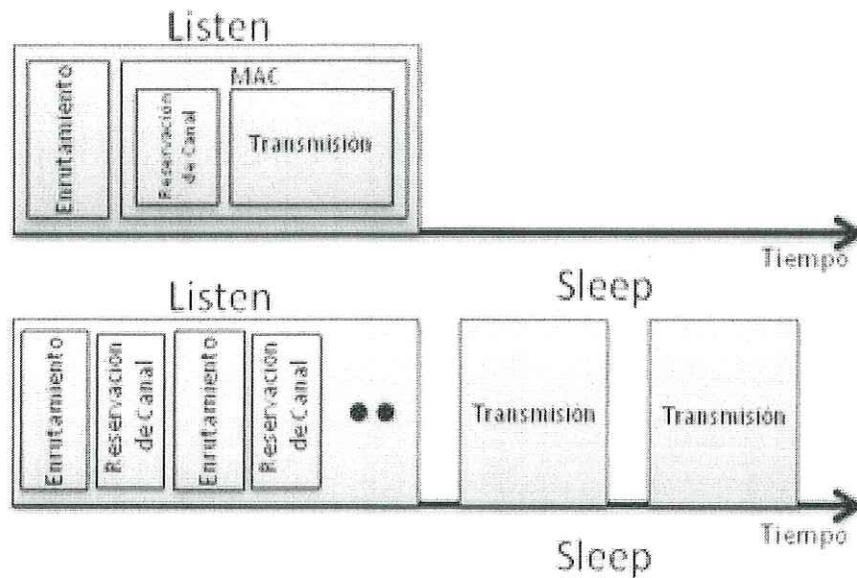


Figura 3.4: Comparación de LAS-MAC con S-MAC

A diferencia de S-MAC, el protocolo LAS-MAC en el periodo de listen calendariza los brinco que debe realizar para la transmisión, es decir, si el nodo 1 desea comunicarse con el nodo 5, en el periodo de listen se calendariza los 4 saltos que realizará.

La secuencia RTS/CTS/DATA/ACK es reducida a RTS/DATA, y de esta manera es disminuido el consumo de energía, esto se muestra en la figura 3.5. La idea básica de esto, es utilizar el RTS como CTS en el segundo salto, es decir, del nodo A al nodo B, el RTS cumple con su función normal, pero al momento de que el nodo B transmite el RTS al nodo C, el nodo A tomará el RTS como un CTS, asumiendo que así que el RTS si llegó a su destino. Al igual con DATA, que funciona como ACK cuando el nodo receptor lo manda en cadena hacia los nodos siguientes.

3.5.1. Ventajas

Disminuye de manera satisfactoria el consumo de energía y la latencia (es más eficiente que el S-MAC), y a su vez, la transmisión de la información es N veces más rápido que S-MAC (N =Saltos o nodos).

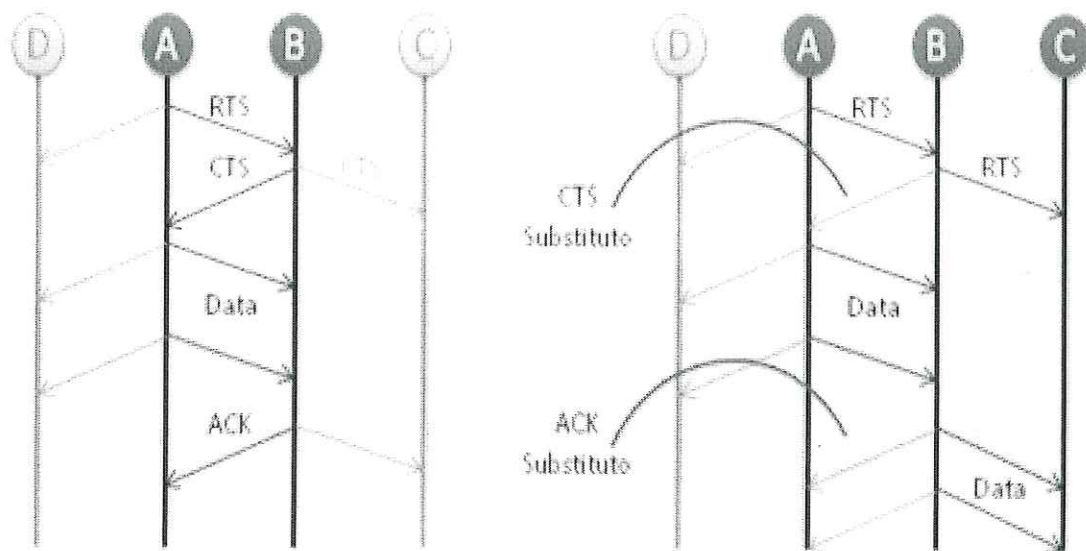


Figura 3.5: S-MAC vs LAS-MAC

3.5.2. Desventajas

Es algo incierta su funcionalidad, al calendarizar los saltos a futuro no garantiza su llegada. Los autores no especifican que sucede en el momento que exista algún problema en determinado salto.

3.6. WISEMAC

Es un protocolo que tiene una eficiencia en el consumo de energía está basado en la técnica de sincronización llamada preamble sampling. Es considerado para una topología de infraestructura [5], es decir, se compone de varios puntos de acceso interconectados alrededor de la red, dándole servicio a todos los nodos que se encuentran en la red.

Este es otro protocolo que solamente fue simulado, pero a diferencia de los antes mencionados, fue simulado en GloMoSim.

Para el diseño de este protocolo, se hace mención a la propuesta llamada "Spatial TDMA and CDMA with Preamble Sampling" [6], la cual consiste en utilizar TD-

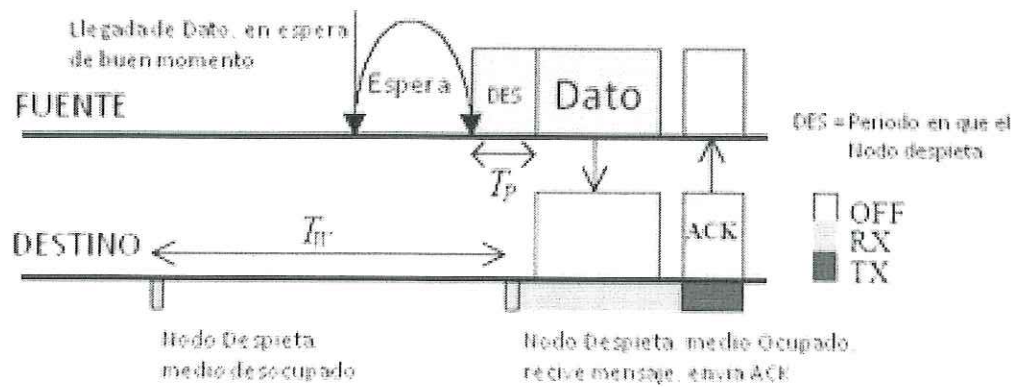


Figura 3.6: WISEMAC

MA para transmitir datos por el canal y CDMA para cuestiones de control del canal. La propuesta de WiseMAC es algo similar, a diferencia que éste solo requiere de un canal. Este protocolo utiliza la técnica de acceso al medio np-CSMA junto con la técnica preamble sampling.

Como se menciono antes, WiseMAC está basado en la técnica de preamble sampling [7][8], la cual, consiste en que el nodo este muestreando el medio de manera regular para verificar si existe alguna actividad (Figura 3.6). Para muestrear el medio, el nodo escucha por un periodo pequeño el canal, si el medio está ocupado, el nodo sigue en escucha continuamente hasta que el dato es recibido o hasta que el medio este desocupado nuevamente. Las calendarizaciones en este caso, son independientes una de otra.

La estación base envía un preámbulo de wake-up, del tamaño del período de muestreo, delante de cada trama de datos para asegurarse que el receptor está despierto cuando el paquete de datos llegue a él. Esta técnica consume poca energía cuando el canal esta libre.

La desventaja de este protocolo consiste en que cuando los preámbulos de wake-up son largos, provocan limitaciones en el caudal eficaz y consumo muy alto de energía en el receptor. Los gastos de energía en el receptor no solo afectan a este nodo, sino

Protocolo	Acceso al Medio	Simulado	Implementado
S-MAC	CSMA	ns-2	Rene Mote, Mica Mote
LAS-MAC	CSMA	ns-2	—
WiseMAC	np-CSMA	GloMoSim	—

Tabla 3.1: Tabla Comparativa de Protocolos

también al resto de los nodos por culpa del overhearing.

Al utilizar un preámbulo fijo, el consumo de energía es alto, para reducir este consumo, WiseMAC ofrece un método para determinar el tamaño del preámbulo de manera dinámica. Este método lo que hace es conocer la calendarización de hibernación de los nodos vecinos transmisores. los nodos actualizan la calendarización de hibernación de sus nodos vecinos durante cada intercambio de datos entre ellos. Es decir, cada nodo cuenta con una tabla en la cual almacenan la calendarización de hibernación de sus vecinos.

3.6.1. Ventajas

El utilizar un preámbulo de manera dinámica da un mejor rendimiento cuando el tráfico es de manera variable.

3.6.2. Desventajas

La calendarización de los nodos se lleva a cabo de manera independiente, es decir, son diferentes los tiempos de cada nodo, esto ocasiona que los datos continúen almacenados (se quedan en el buffer) cuando el nodo se encuentra en modo de hibernación dando como resultado demasiada latencia.

En la Tabla 3.1 se muestra la comparación de los protocolos analizados.



Figura 3.7: T-MAC

3.7. Otros Protocolos

3.7.1. T-MAC

Es parecido al S-MAC, solo que cuenta con una mejora, este consiste en disminuir aun más el consumo de energía [9]. La técnica consiste en estar escuchando el medio durante un tiempo determinado (TA) después de haber transmitido o recibido algún paquete, si en ese lapso no hay actividad, el nodo se va al periodo de sleep el resto del periodo de listen, como se muestra en la figura 3.7. Esta técnica es óptima cuando el tráfico no es constante.

La gran desventaja de este protocolo, es que la latencia aumenta de manera considerable, debido a que el ciclo de trabajo es aun más corto.

3.7.2. DSMAC

Al igual que T-MAC, es una mejora de S-MAC, que consiste en tener ciclos de trabajo dinámicos [10] para disminuir la latencia.

La técnica utilizada es guardar el valor de la latencia de cada nodo en el primer salto, de esta manera, cuando un nodo quiere transmitir, va a saber el promedio de latencia del nodo destino y así sabrá si doblar o no el ciclo de trabajo para realizar la transmisión, esto se ve en la figura 3.8. Cuando el promedio de la latencia del nodo es alto, el transmisor decrementa el periodo sleep y lo anuncia al momento de realizar la sincronización.

La gran ventaja es que disminuye la latencia para cada nodo, y la diferencia en-

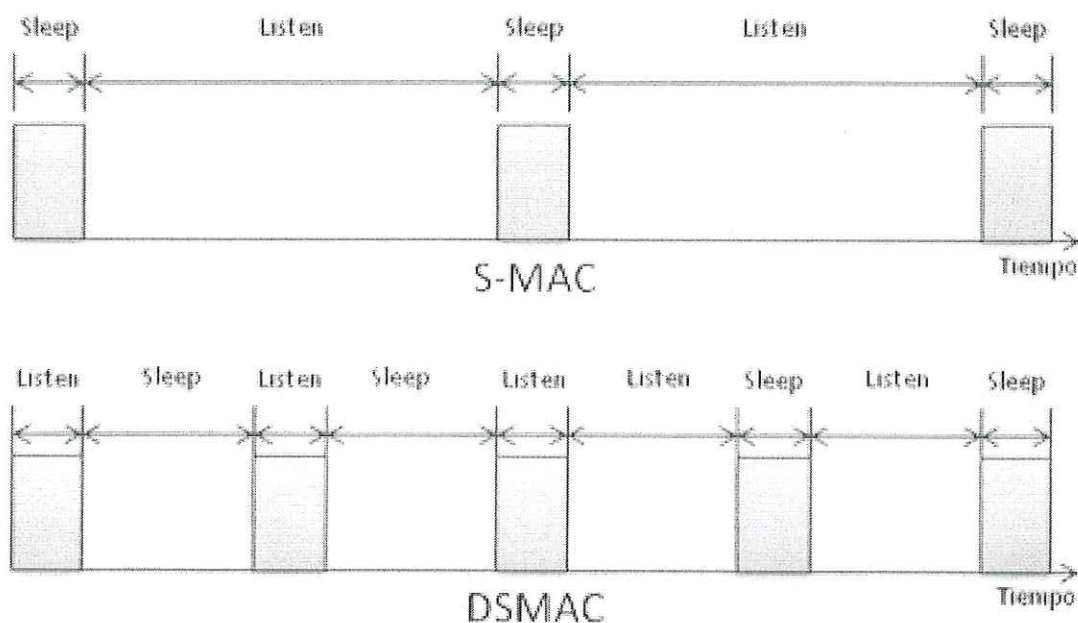


Figura 3.8: DSMAC

tre el consumo de energía no es muy grande (entre S-MAC y DSMAC).

Se ha demostrado que la gran mayoría de estos mecanismos son lo suficientemente estables y confiables. Sin embargo, estos no cuentan con la suficiente información para poder implementarlos en la vida real, mostrando solamente resultados y una breve explicación de su funcionamiento.

Otra desventaja de estos métodos, es que su mayoría, no fueron implementados y simplemente se llevaron a la simulación, obligando a los otros investigadores a tratar de repetir sus resultados mediante la poca información que se tiene de éstos.

3.8. Resumen

La mayoría de las propuestas encontradas en la literatura, son basadas en S-MAC o son mejoras que se le han realizado. Todos estos protocolos tienen como objetivo el eficientizar el uso de energía para alargar la vida de los nodos sensores.

El único protocolo, de los aquí mencionados, implementado y simulado, fue S-

MAC, mientras que los otros protocolos solamente han sido simulados. Las ideas del protocolo S-MAC, sirvieron de referencia para el estándar IEEE 802.15.4.

Capítulo 4

Hardware y Software Utilizado

4.1. Introducción

En este capítulo se explicarán las características tanto del software como del hardware (PAN802154HAR00) utilizados en el desarrollo de nuestra aplicación, y a su vez se mostrarán los códigos fuente que soporta este módulo de la compañía Freescale.

4.2. PAN802154

El nodo utilizado fue el PAN802154HAR00 [27], el cual cumple con el estándar 802.15.4. Esto es, sólo define funciones para la capa 1 y 2 de la pila de protocolos de las WSN.

Este nodo tiene una tasa baja de transferencia y bajo consumo de energía. Cuenta con una antena transmisor-receptor (transceiver) MC13193 [39] de la compañía de Freescale), un microcontrolador (GT60 También de Freescale) y con licencia para utilizar la pila del protocolo ZigBee de Freescale. También cuenta con una interfaz RS232 para la comunicación serie con algún dispositivo externo y con dos antenas impresas en la tarjeta que operan en la banda de 2.4 GHz (una para transmitir y otra para recibir).

Entre las principales Características [26] del nodo están:

- Soporte para ZigBee, 802.15.4 o Simple MAC.
- Banda de 2.4 GHz (ISM), con un ancho de banda de 80 MHz.

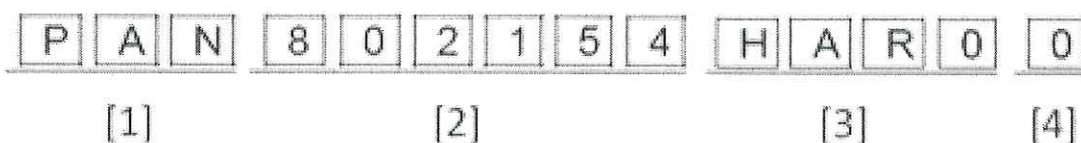


Figura 4.1: Descripción del PAN

- 16 canales espaciados por 5 MHz, con tasa de transferencia de 250 Kbps.
- 2 convertidores Analógico/Digital de 10 bits y puede configurar hasta 8 puertos de entrada y salida digital.
- Salida nominal de potencia de 0dBm, con una máxima de 3 a 5 dBm y una mínima de -16dBm (La salida es programable).
- Sensibilidad de recepción: -92 dBm con 1.0 % de paquetes con error.
- Rangos de consumo de energía:
 - 2.2VDC a 3.4VDC sin usar RS-232.
 - 3.0VDC a 3.4VDC con RS-232.

La composición del significado de cada parte del PAN802154HAR00[25] que se muestra en la figura Figura 4.1, se describe a continuación:

[1] Código del Producto.

[2] Serie del Producto.

[3] Tipo de Producto

H : Header Conection.

A : Antena en la tarjeta.

R : Interface RS-232.

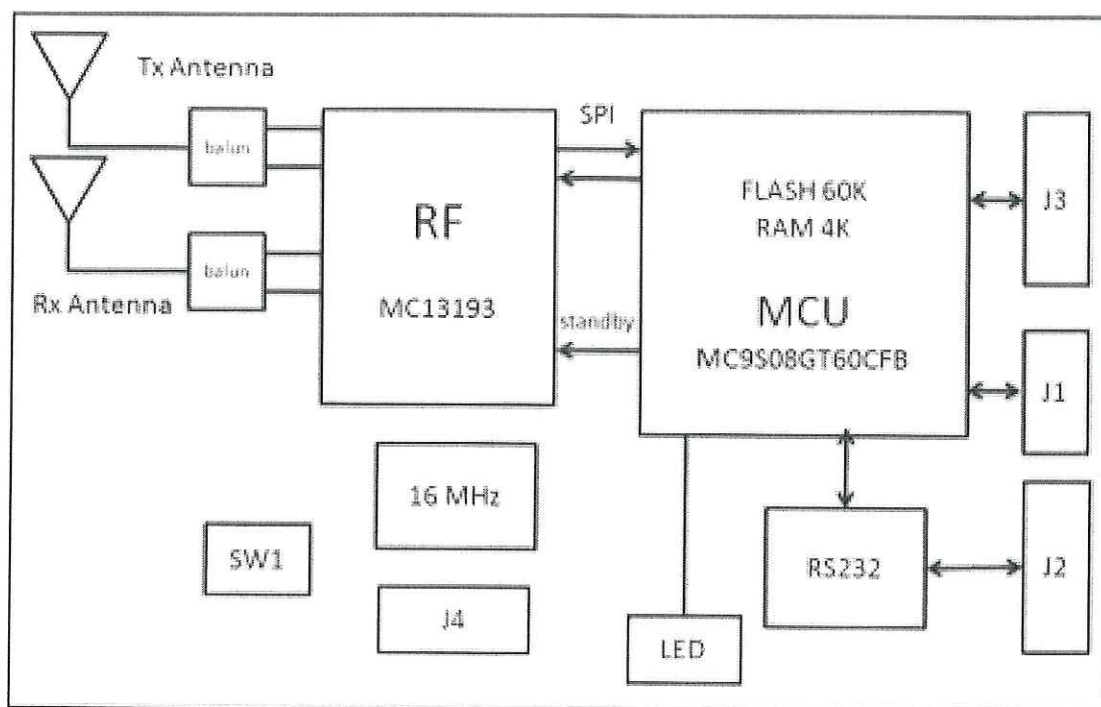


Figura 4.2: Diagrama a bloques del PAN802154HAR00

0 : Temperatura Comercial.

[4] Versión.

En la figura 4.2 se muestra el diagrama a bloques del hardware utilizado. Donde J1 es el conector de 6 pines para la programación del nodo, J2 es el conector de 10 pines para la comunicación del puerto serie del nodo, J3 es la cabecera con 10 pines de los puestos de E/S, y J4 es la cabecera con 4 pines del conector de energía para el nodo.

4.2.1. MCU

La unidad de Microcontrolador que utiliza el módulo de freescale es el MC9S08GT60CFB [40]. Este cuenta con un microprocesador de 8 bits, una memoria Flash de 60 Kbytes, memoria RAM de 4 Kbytes y un convertidor Analógico Digital de 10 bits. Es en estos 60 Kbytes de memoria flash es donde se cargan los protocolos de capa 3,4 (si son requeridos) y la aplicación. De aquí la importancia de incorporar

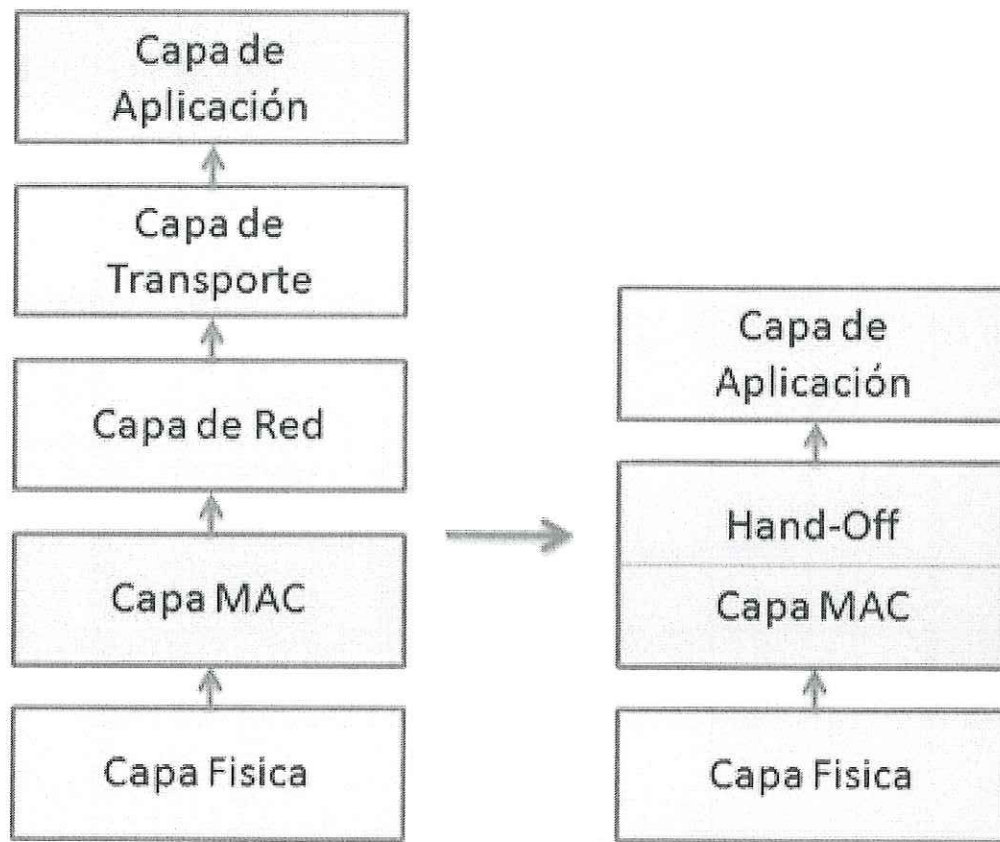


Figura 4.3: a) Pila de protocolos de las WSN, b) Simplificación de la pila

un mecanismo de transferencia de celda a la aplicación, tal y como se muestra en la figura 4.3, en donde se muestra como se substituirá el mecanismo de Hand-Off por la capa de red.

4.2.2. RF

El transceiver de Radio Frecuencia que utiliza el PAN802154HAR00, es el MC13193 [39]. La distancia de comunicación de estos módulos puede variar dependiendo del área en donde estén localizados, a campo abierto se puede lograr un alcance de hasta 100 metros de radio, y en ambientes indoor puede cubrir hasta 30 metros de radio (esta ultima dependerá del material de las paredes u objetos por la cual atravesará la señal).

4.3. Freescale Beekit

Beekit[28][32] es un repositorio de código fuente que contiene archivos de configuración y de generación de plantillas para el desarrollo de aplicaciones. En beekit se puede seleccionar tanto el código base de Simple-MAC (Simple Media Access Control), como el de MAC de Freescale (Apegada al estándar) y de BeeStack que sería la solución de ZigBee para Freescale.

En este repositorio también se encuentran demostraciones para cada código base y así, el programador puede ver como funciona la máquina de estados de cada código base.

Después de seleccionar el código base en el que se desea trabajar, hay que crear un proyecto, en este proyecto se puede tener más de una solución, esto permite al usuario tener distintas aplicaciones en un solo proyecto. Al crear el proyecto, se debe de exportar, obteniendo un proyecto en formato xml, para posteriormente importarlo al CodeWarrior, que es un compilador en C/C++ que soporta la programación de dispositivos RF de la familia MC1319x.

4.4. Simple MAC (SMAC)

Simple-MAC [29][41] es un código base en ANSI C, que se encuentra disponible en el repositorio de desarrollo de Freescale llamado Beekit [28]. Simple-MAC es muy parecido al método de acceso Aloha [11], debido a que está diseñado para transmitir en el momento en el que se le pida al modulo sin antes hacer una petición del canal, como se muestra en el diagrama de la figura 4.4.

El código fuente de Simple-MAC es de uso libre, esto permite al programador modificarlo y adaptarlo a las necesidades de la aplicación. El código de Simple-MAC, cargado en el módulo, ocupa como máximo 2 Kbytes de memoria Flash y 10 bytes de memoria RAM [41], mas el tamaño de la trama, y está diseñado para ofrecer un bajo consumo de energía.

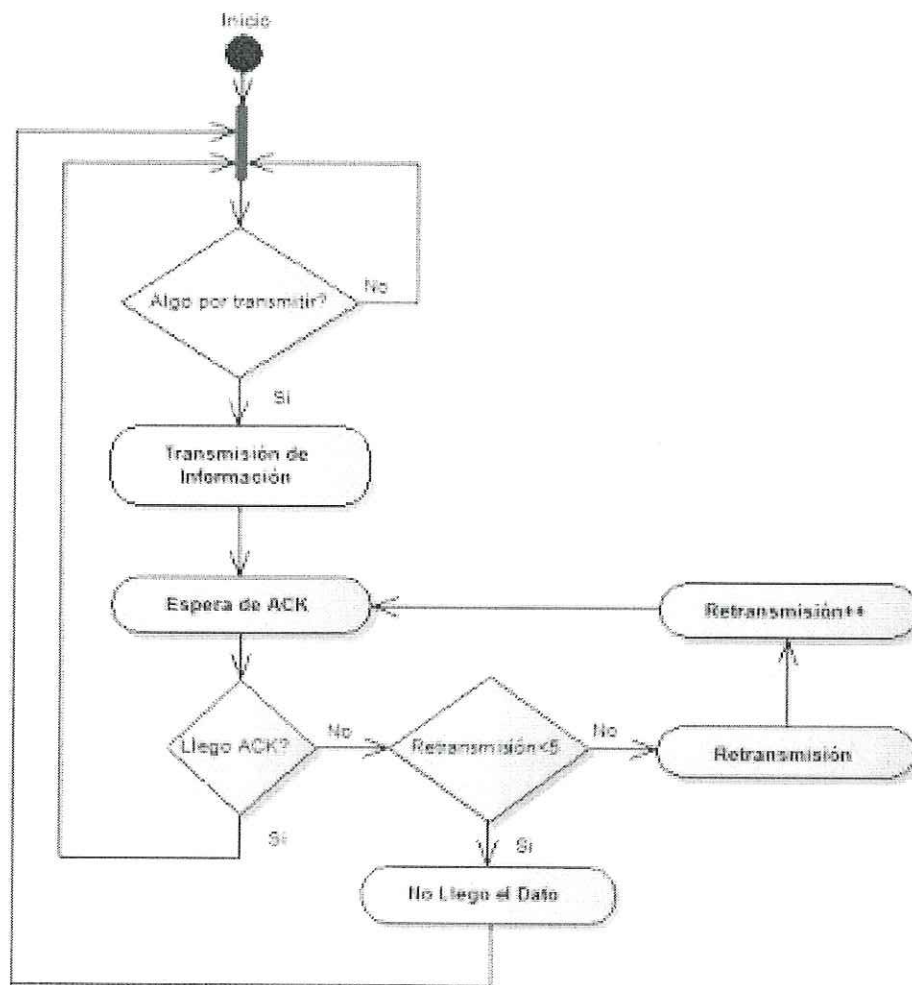


Figura 4.4: Diagrama de Flujo para la transmisión de información de Simple-MAC

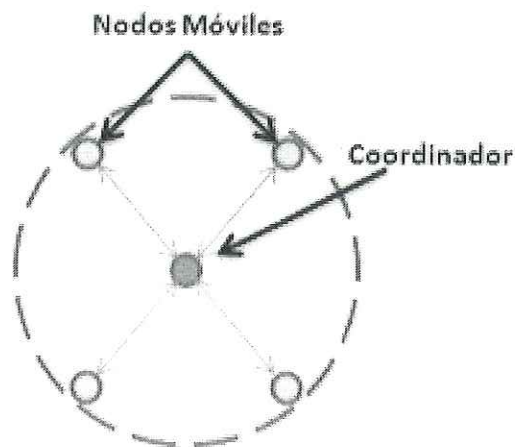


Figura 4.5: Topología de Simple-MAC

La máquina de estados de SMAC está basada en un ciclo infinito. Únicamente cambia de estado al existir una interrupción, por ejemplo, en la transmisión y recepción de paquetes.

Simple-MAC permite una topología en estrella, como se muestra en la figura 4.5, la cual consta de un nodo central (Coordinador) que coordina a los demás nodos, y varios nodos periféricos que se encuentran a disposición del Coordinador.

El estándar IEEE 802.15.4 define una trama como la que se muestra en la figura 4.6, y utiliza su propio protocolo de acceso al medio basado en TDMA/CSMA. Este protocolo es muy complejo y no puede ser modificado, lo mismo sucede con la trama. De aquí la necesidad de hacer una propuesta de trama y de un protocolo de acceso al medio que facilite la integración del mecanismo de Hand-Off propuesto. Por otro lado la trama, de Simple-MAC no maneja direccionamiento, bytes de control ni algún otro tipo de campos que no sea la carga útil. Esto ocasiona que este método de acceso funcione en modo promiscuo. En la figura 4.6 se muestra la estructura de la trama de Simple-MAC, de la MAC 802.15.4 y la estructura de la trama física.

Simple-MAC, al contar con una trama MAC muy simple, hace que la red se limite a tener uno o varios nodos transmitiendo y recibiendo información sin saber de que nodo llegaron o a quien va dirigida la información.

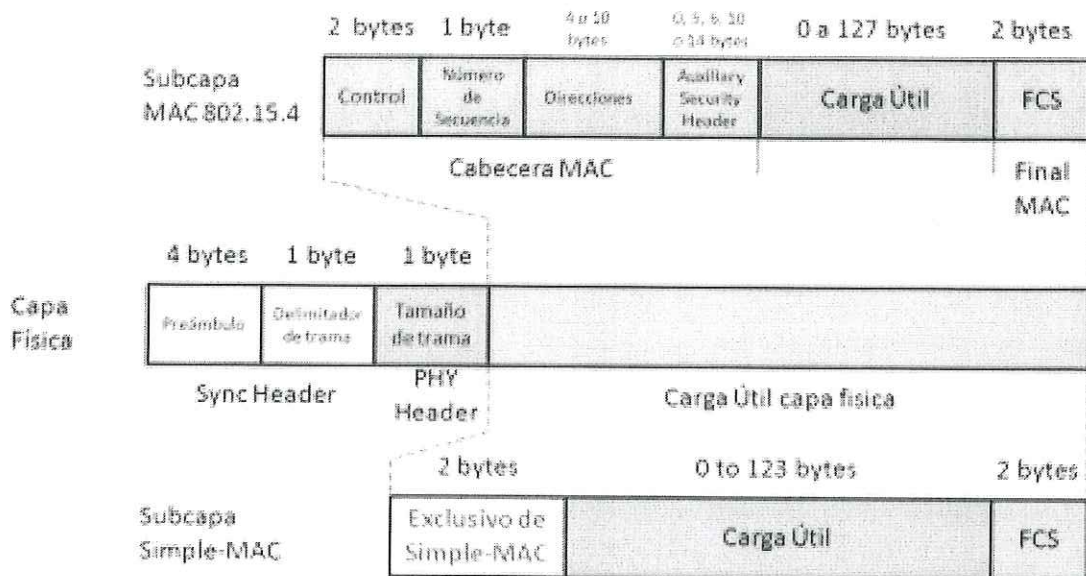


Figura 4.6: Trama Simple-MAC

Las diferencias entre la estructura de los paquetes Simple-MAC y MAC 802.15.4 son: Simple-MAC no utiliza una estructura con bytes de control o direccionamiento, es decir, su estructura es solamente la carga útil de la aplicación, también cuenta con 2 bytes exclusivos. Los dos bytes exclusivos de Simple-MAC son proporcionados como identificador de paquete, es decir, si se activan, al momento de hacer una comunicación solamente nodos que cuenten con Simple-MAC podrán escucharlos, si estos bytes son desactivados, cualquier red de sensores podrá escucharlos (Modo Promiscuo).

El payload puede ir de 0 a 123 bytes, y es la única parte que puede ver el usuario al momento de realizar una aplicación. En esta parte, el programador puede implementar su propia trama para la aplicación que quiera realizar.

Por su parte, 802.15.4, utiliza una estructura muy bien definida con direcciones, bytes de control y de 0 a 10 bytes de seguridad.

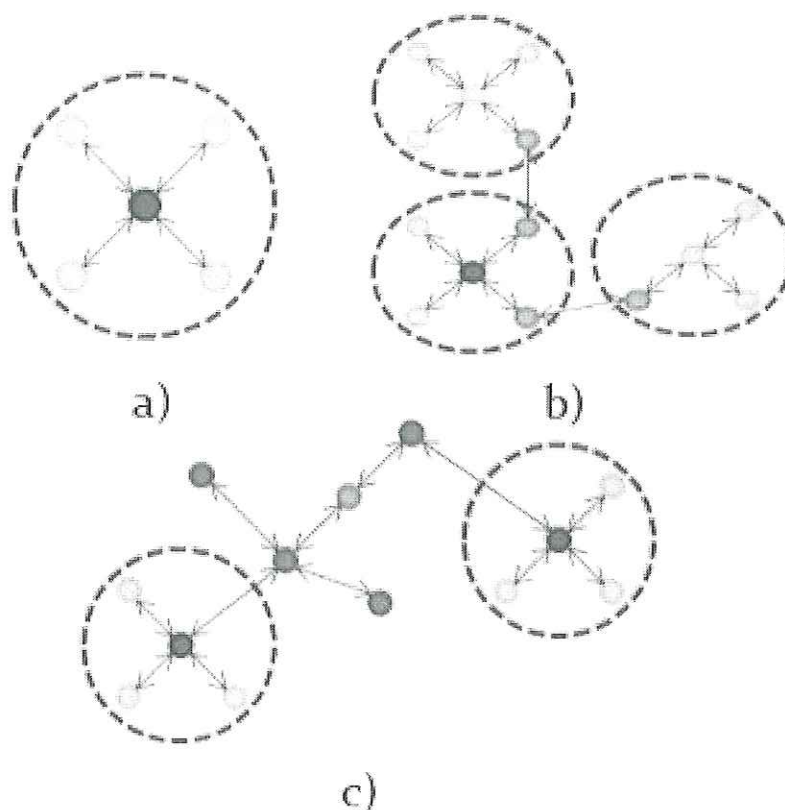


Figura 4.7: Topologías SMAC, MAC y BeeStack

4.5. BeeStack

BeeStack es la solución ZigBee que ofrece Freescale [31], BeeStack Provee enrutamiento, creación y configuración de la red y la sincronización respectiva de los dispositivos.

Como característica general de BeeStack, ésta se encuentra montada sobre la MAC de Freescale, por esta razón, ambas comparten la misma máquina de estados.

A diferencia de la MAC de Freescale, BeeStack, al igual que ZigBee, cuenta con tres tipos de dispositivos, los Coordinadores, los enrutadores y los nodos sensores.

En la Figura 4.7 se muestran las topologías a las que pueden llegar tanto SMAC, MAC de Freescale y BeeStack, en la imagen a) se muestra la topología de SMAC, en la b) de la MAC de Freescale y en la c) BeeStack.

4.6. CodeWarrior

CodeWarrior es un entorno de desarrollo integrado con plataforma para MacOS, Windows, Linux y sistemas embebidos, de la empresa Freescale Semiconductor.

Codewarrior[33][34] proporciona un marco visual y automatizado el desarrollo de aplicaciones sin importar lo complejas que sean. Una de las cosas que proporciona CodeWarrior es un compilador en C/C++ y bibliotecas en tiempo de ejecución para así facilitar el uso de comandos y funciones de las librerías de C.

En otras palabras, CodeWarrior es la plataforma en donde se puede desarrollar aplicaciones para los módulos de Panasonic que cuentan con el Microcontrolador HC(S)08 o HCS12.

4.7. Resumen

El Módulo PAN802154HAR00 cuenta con soporte para ejecutar los protocolos de acceso al medio ZigBee, IEEE 802.15.4 y Simple-MAC de Freescale, lo cual lo hace un módulo óptimo para el desarrollo de aplicaciones en WSN. Además la compañía Freescale provee un repositorio de códigos fuente y un entorno gráfico muy amigable para el usuario o programador.

El código suministrado por Freescale para la implementación de Simple-MAC, es un código muy básico en el que el nodo receptor se pone en estado de recepción y no sale de ese estado hasta que es interrumpido por la llegada de un paquete de datos. El procesamiento e interpretación del paquete de datos depende de la aplicación que el usuario desarrolle.

Simple MAC, es un método de acceso al medio sencillo de implementar, que da facilidades al programador para desarrollar su aplicación. También es de bajo consumo de memoria, por estas dos características se eligió a este protocolo como base para implementar el mecanismo de Hand-Off propuesto en esta tesis.

Capítulo 5

Mecanismo de HAND-OFF Propuesto

5.1. Introducción

Como se menciona en sección 1.2.1, el implementar un mecanismo de Hand-Off en capa 2 ayuda evitar el diseño de una 3ra capa en las WSN, esto gracias a que con un correcto mecanismo de Hand-Off, se puede expandir la red a un número indefinido de celdas WSN (cada celda con su respectivo coordinador).

La propuesta que se desarrolló en esta tesis está orientada a resolver la problemática de nodos móviles que se desplazan dentro de edificios, como oficinas, hospitales, escuelas, en general en edificios con la estructura que se muestra en la figura 5.1.

El mecanismo de transferencia de celda o Hand-Off también es llamado Handover [35], este mecanismo es muy utilizado en la telefonía celular, la cual consiste en hacer el cambio de celda cuando la calidad del enlace de la celda en la que un nodo está conectado es muy poca o también cuando hay otra celda con mejor calidad de enlace, en resumen un nodo puede necesitar transferirse de celda cuando la potencia que recibe es muy poca y tiene la opción de cambiarse a una celda con mayor calidad de enlace, tal como se muestra en la figura 5.2.

Implementar un mecanismo de Hand-Off en las WSN tendría el beneficio de interconectar nodos móviles en celdas adyacentes, con lo cual se incrementaría el área de trabajo o cobertura de estos nodos móviles.

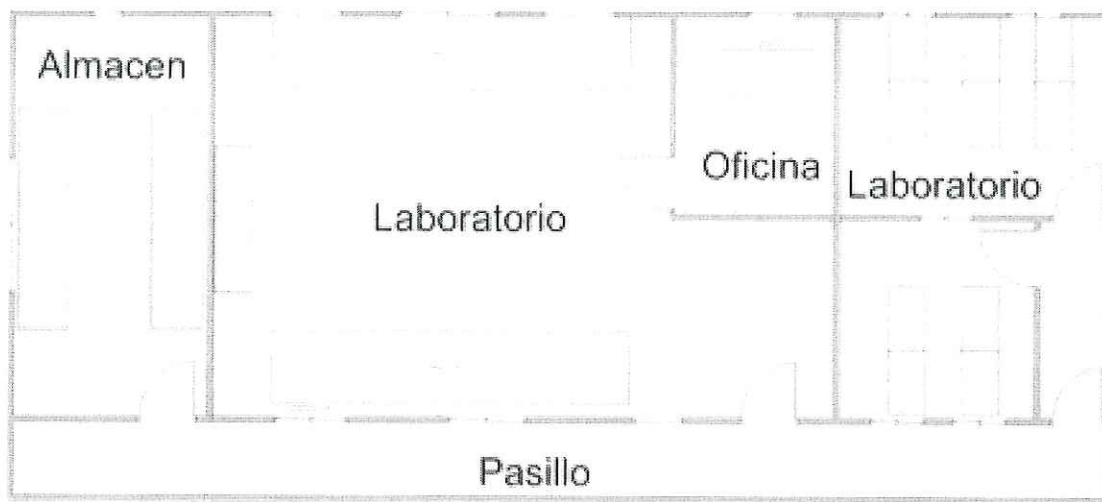


Figura 5.1: Estructura típica de un edificio donde operara la herramienta diseñada, la distribución y estructura varia dependiendo del lugar

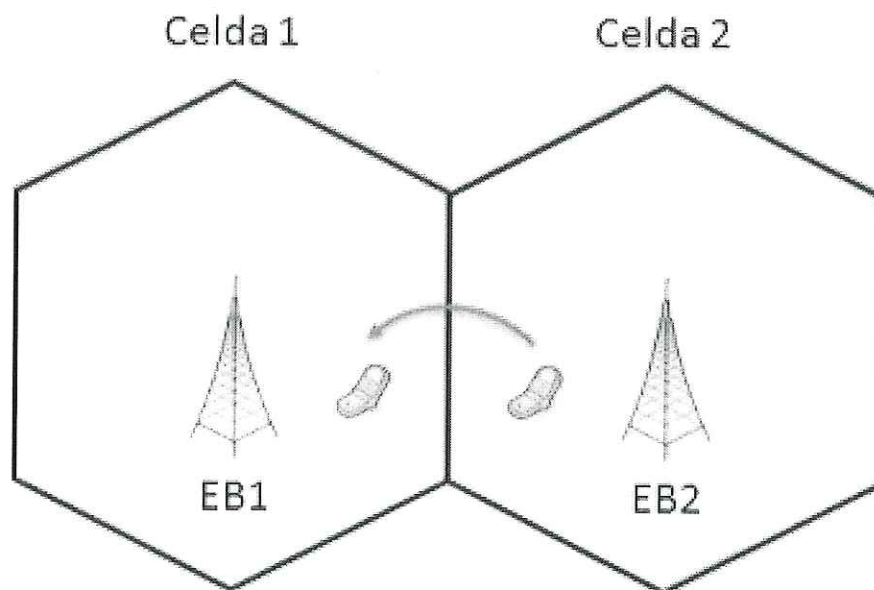


Figura 5.2: Hand-Off

El mecanismo de Hand-Off propuesto se agrego al método de acceso al medio Simple-MAC. Una de las principales razones por la que se selecciono este método, fue por la forma en que se deja abierta la posibilidad de desarrollar o aumentar la capa MAC para los programadores, como también no tener problemas de derechos de autor.

Los mecanismos de Hand-Off tienen la característica principal de que deben ser transparentes para el usuario, es decir, un usuario jamás deberá darse cuenta cuando exista un cambio de celda en un dispositivo. El mecanismo de Hand-Off implementado en este trabajo de tesis, cumple con esta característica. Las mediciones realizadas a este mecanismo comprueban esta características y se mostraran en el capítulo 7.

5.2. Hand-Off Basado en RSSI

El mecanismo de Hand-Off propuesto se basa en la intensidad de la señal recibida (RSSI "Received Signal Strength Indication") [36], debido a que los nodos hacen el cambio de celda cuando la calidad de la señal recibida está por debajo de un umbral determinado por las características del hardware en la etapa de recepción utilizada. En este caso, el nodo utilizado se describió en el capítulo 2 y marca como umbral -92 dBm.

Para poder determinar el umbral correcto para la aplicación, se deben de realizar mediciones en el entorno en el que el nodo móvil operará, y en base a estas mediciones, determinar el área de cobertura de la celda. Los resultados de estas mediciones se mostrarán en la sección 5.6.

5.3. Tipos de Hand-Off

El Hand-Off se puede clasificar desde el punto de vista del usuario o desde el punto de vista de la red.

5.3.1. Punto de Vista del Usuario

Desde el punto de vista del usuario, todavía se puede subdividir en dos tipos:

- **Soft-Handover:** Durante el cambio de celda, el dispositivo estará conectado por un canal a la estación base origen, y por otro canal se conectará a la estación base destino. Durante este proceso, la transmisión se realizara en paralelo hacia las dos estaciones base, por esta razón, no existirá interrupción en el enlace.
- **Hard-Handover:** Antes de que el nodo haga el cambio de celda, este se desconecta de la estación base en donde estaba anteriormente por un tiempo determinado (corto), es decir, dura cierto tiempo desconectado de la red.

En la figura 5.3 se puede mostrar el ejemplo tanto de Soft-Handover como de Hard-Handover, en donde EB se refiere a Estación Base.

5.3.2. Punto de Vista de la Red

En este punto de vista existen dos tipos de cambio de celda, que son:

- **Intra-Cell Handover:** Es el cambio de canal pero de la misma estación base.
- **Inter-Cell Handover:** Es el cambio del nodo a otra estación base.

5.4. Aportación

La implementación del mecanismo de Hand-Off se realizó sobre el protocolo Simple-MAC de Freescale. El mecanismo propuesto es del tipo Soft-Handover, como se mostró en la figura 5.3a. A este protocolo de acceso al medio se le agregaron más características, como lo es una nueva trama MAC con direcciones fuente-destino y bytes de control, así como la ranuración del canal de transmisión, pasando de un Simple-MAC tipo Aloha a un Simple-MAC tipo Aloha ranurado.

5.5. Nueva trama en Simple-MAC

Las topologías utilizadas en WSN pueden ser en estrella, malla, y raramente se utiliza punto-a-punto. En este trabajo se utilizó una topología en estrella, esta se en-

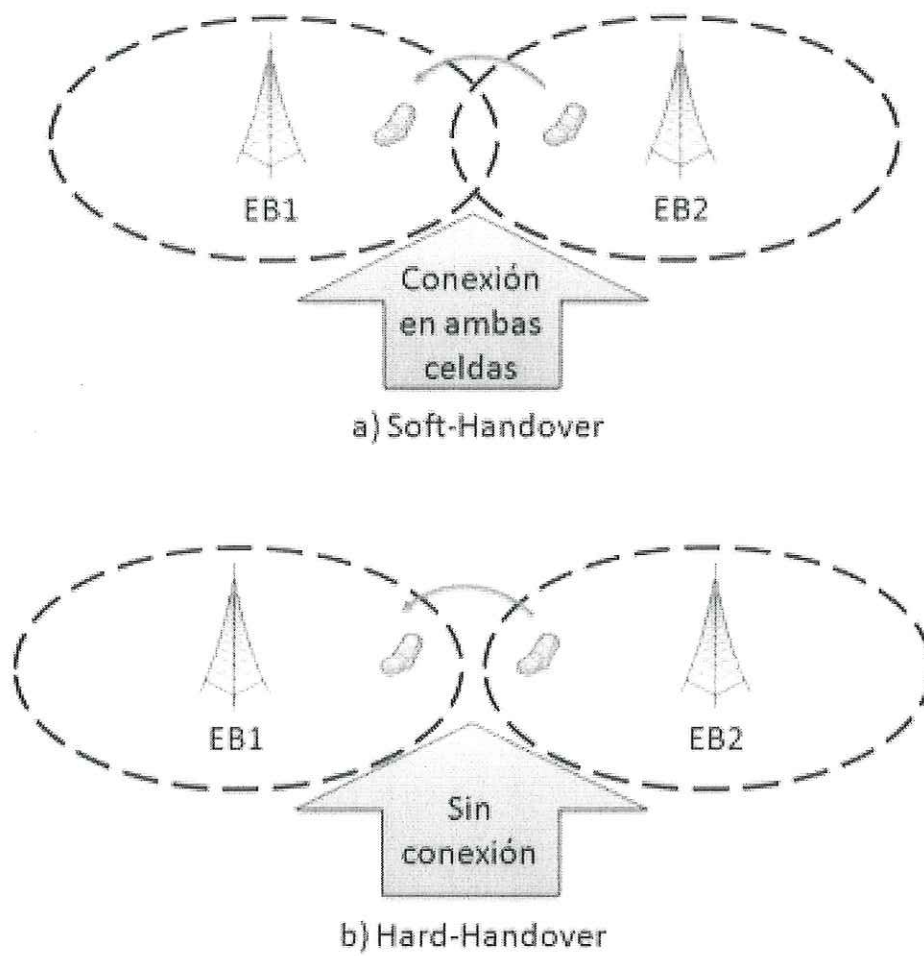


Figura 5.3: Punto de vista del usuario. a) No existe tiempo de desconexión, b) Existe un tiempo de desconexión que depende de la separación entre celdas

1 byte	2 bytes	2 bytes	0 a 121 bytes	2 bytes
Byte de Control	Dirección Fuente	Dirección Destino	Carga Útil	Num. Secuencia

Figura 5.4: Trama Propuesta

cuentra formada por un nodo central y nodos periféricos, tal como se muestra en la figura 4.5 de la sección 4.4.

También es necesario definir una forma de direccionamiento para identificar a cada uno de los nodos que forman la red. Ya que la trama Simple-MAC no cuenta con este mecanismo de direccionamiento, es necesario desarrollar una nueva trama que incluya campos de direccionamiento para identificar a cada uno de los nodos que forman la red. La trama Simple-MAC también carece de campos de control, por lo que la nueva trama debe incluirlos. Estos campos de control tendrán la función de: Identificar el tipo de transmisión (unicast o broadcast) y tipo de paquete (Dato o Control). Los paquetes de control pueden ser: Reconocimiento positivo (ACK) o negativo (NACK).

La trama propuesta se muestra en la figura 5.4. Esta consiste de un byte de control, 2 bytes de dirección fuente, 2 bytes de dirección destino, un carga útil variable de 0 a 121 bytes, finalizando con 2 bytes para número de secuencia de paquete.

La nueva trama definida tiene una longitud máxima de 128 bytes, esto la hace compatible con el estándar IEEE 802.15.4. La estructura del campo de control se muestra en la figura 5.5. El bit 0 se utiliza para determinar si la trama recibida es de tipo Broadcast (1) o Unicast (0). El bit 5 se utiliza para conocer si el paquete recibido es de datos (0) o control (1). El bit 6 se utiliza para determinar si el paquete recibido es ACK (0) o NACK (1). Los bits del 1 al 4 y 7 no están definidos en esta aplicación, dejando su uso para aplicaciones posteriores.

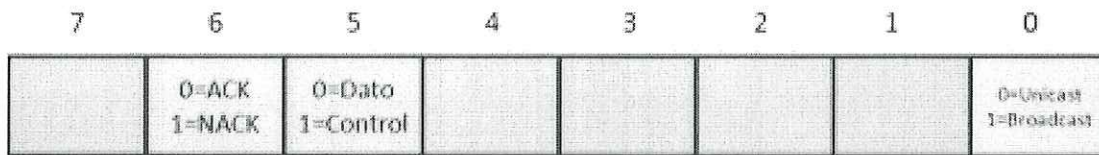


Figura 5.5: Estructura del campo de Control

5.6. Celdas en WSN

Para lograr incrementar el área de cobertura de un nodo móvil, se puede realizar de dos formas: mediante mecanismos de enrutamiento o mecanismos de Hand-Off. El desarrollar un mecanismo de routing, implica la programación de una capa de red, haciendo así mas pesada la pila de protocolos de las WSN. La otra solución a la necesidad de incrementar el área de cobertura en la que un nodo móvil pueda operar libremente es la implementación de un mecanismo de Hand-Off. Al agregar un mecanismo de Hand-Off, la WSN se convertirá en una red multicelular. En cada celda habrá un coordinador encargado de administrar a los nodos móviles que se encuentren en su área de cobertura. Tal como se muestra en la figura 5.6, en donde hay el escenario de una red con unicelular y otra multicelular de la telefonía celular.

Para determinar el área de cobertura de las celdas se realizaron mediciones del alcance transmisión-recepción considerando los parámetros del hardware utilizado. Las mediciones se hicieron en un lugar cerrado (de 15 x 10 metros), el cual contaba con mesas de trabajo, paredes de concreto, bancos, y algunos objetos metálicos. En mediciones de prueba se observó una pérdida considerable de la señal a distancias superiores a 10 metros para un ambiente indoor, por lo tanto en el experimento se colocaron dos nodos, un transmisor y otro receptor, y se realizaron mediciones a 10, 9, 8 0 metros de distancia entre cada uno de ellos (los nodos se colocaron uno de frente al otro). Cada iteración del experimento consistió en que el nodo transmisor envió 500 paquetes a un nodo receptor. La pérdida de paquetes en función de la distancia no fue significativa. Sin embargo, la atenuación de la potencia recibida se ve sig-

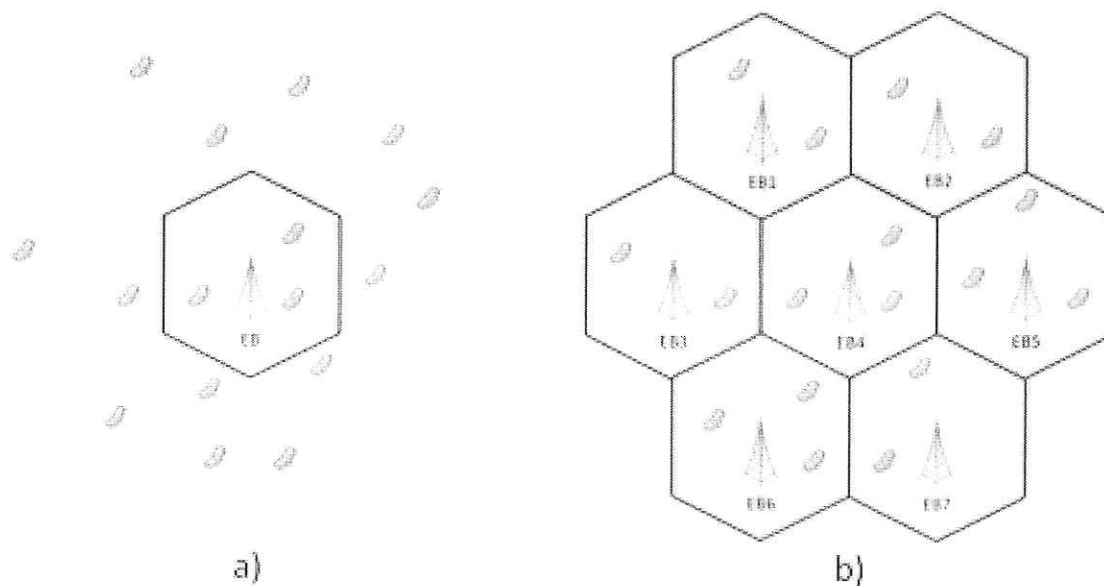


Figura 5.6: a) Red Unicelular, b) Red Multicelular

nificativamente afectada por la distancia.

La figura 5.7 muestra los resultados obtenidos por cada una de las iteraciones del experimento realizadas en un ambiente indoor. De la figura 5.7, cabe resaltar que a una distancia de 7 metros se obtuvo un comportamiento anormal, observando un valle a esta distancia.

Posteriormente se realizaron mediciones en espacios abiertos, siguiendo la misma metodología que en espacio cerrado. Los resultados se pueden observar en la figura 5.8. En base a los resultados descritos en la figura 5.7 y figura 5.8 se concluye que el umbral de detección óptimo para el nodo receptor es de -85 dBm ya que nuestra aplicación puede variar entre un ambiente indoor o en lugar cerrado. Este parámetro está dentro del rango determinado por el fabricante que marca que para una sensibilidad de -92 dBm, existe una tasa de error de 1.0% de los paquetes recibidos. Esto nos indica que el radio de cobertura de una celda de redes de sensores para el hardware utilizado es de 10 metros para un ambiente indoor.

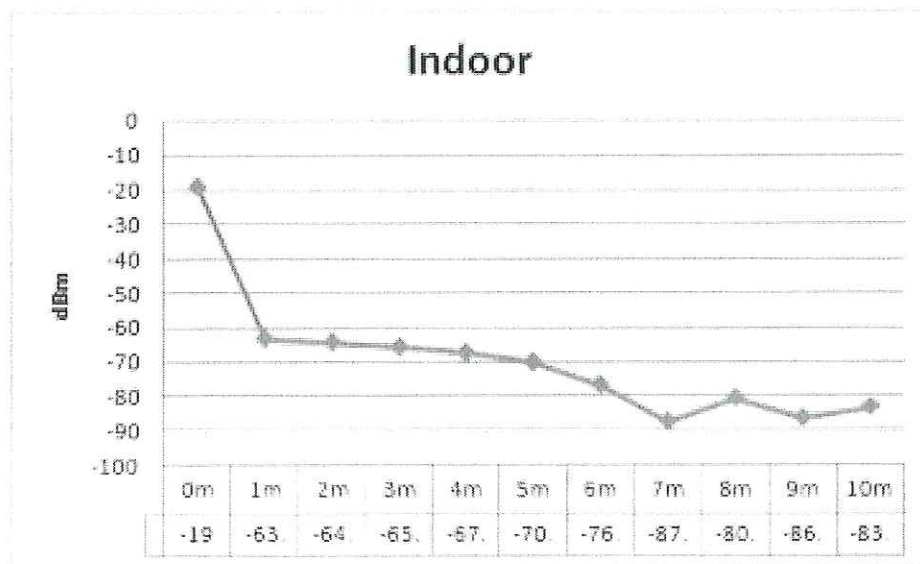


Figura 5.7: Perdida de propagación de potencia contra la distancia en un Ambiente Indoor

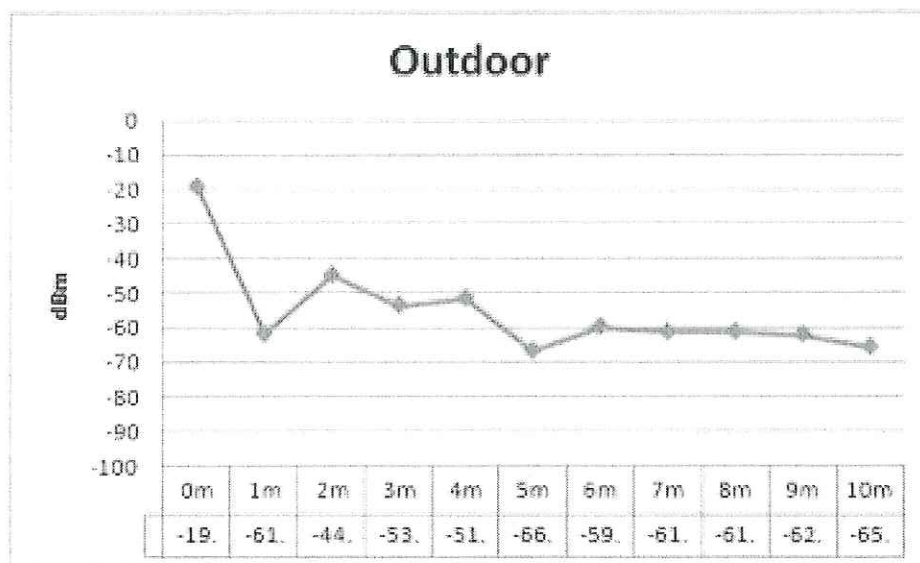


Figura 5.8: Perdida de propagación de potencia contra la distancia en un Ambiente abierto

5.7. Mecanismo de Hand-Off Propuesto

De la sección anterior se observa que el área de cobertura de las WSN para ambientes indoor está limitada por la sensibilidad del nodo receptor. Para expandir el área de cobertura en la que los nodos móviles puedan seguir teniendo contacto con un nodo central, en este trabajo se propone un mecanismo de Hand-Off. Este mecanismo está basado en el parámetro RSSI [37] del hardware utilizado y fijado a -85 dBm.

En la figura 5.9 se muestra un ejemplo de cómo un nodo móvil se mueve al área de cobertura de una celda para así conectarse a ella.

El algoritmo de Hand-Off inicia cuando el nodo móvil desea conectarse a un nodo central, y realiza este procedimiento mediante los siguientes pasos:

1. El nodo móvil envía un paquete broadcast a los nodos centrales. El número de nodos centrales es igual al número de celdas WSN.
2. Los nodos centrales transmiten un paquete de control que lo identifica como coordinador de una celda.
3. El nodo móvil espera que los coordinadores que se encuentran en su alcance le respondan.
4. Los nodos móviles miden la potencia con la que recibieron los paquetes de control enviados por los nodos centrales.
5. En función de la potencia recibida, el nodo móvil decide a que nodo central conectarse.
6. Los nodos móviles enviarán su información al nodo central elegido.
7. Para evitar peticiones de conexiones innecesarias los nodos móviles cuentan con un mecanismo de memoria o histéresis, el cual consiste en que si la potencia recibida no sobrepasa un umbral a la potencia recibida $i-1$, entonces el nodo móvil se mantiene unido al actual nodo central.

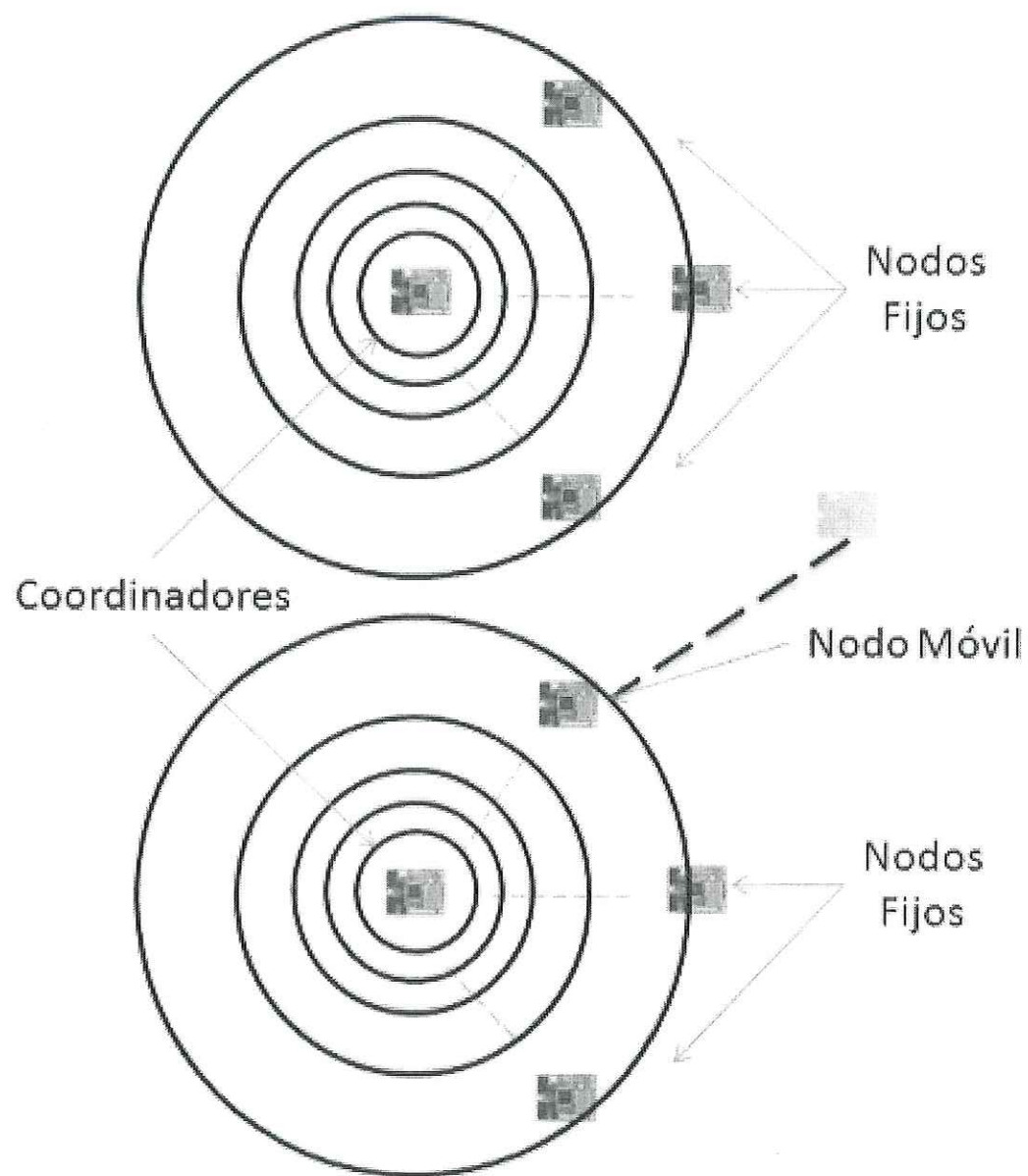


Figura 5.9: Mecanismo de Hand-Off

El paso 3, donde los nodos esperan la notificación de los nodos centrales, es importante para evitar colisiones por parte de los nodos centrales. Una colisión de los nodos centrales puede ocurrir cuando simultáneamente dos o más nodos centrales les responden a algún nodo móvil. Para evitar estas colisiones es necesario ranurar en tiempo el canal de comunicaciones.

Para determinar la ranura de espera, se debe considerar el tiempo que tarda el nodo móvil en procesar un paquete más el tiempo que el nodo central tarda en enviar un paquete.

El nodo móvil tarda en procesar un paquete en un tiempo promedio de 2 mseg. Este promedio está en función de las instrucciones ejecutadas y el tamaño de paquete recibido.

Para determinar el tiempo de respuesta del nodo central, se consideraron los siguientes parámetros:

- Velocidad del bus del microcontrolador: 8MHz, que es equivalente a 0.125 microsegundos por cada ciclo de reloj.
- Tasa de transmisión (Bit Rate): 250 Kbps.
- Tamaño de la trama de respuesta de los coordinadores: 10 Bytes, mas 10 bytes de la capa física.

Considerando una trama de respuesta de los coordinadores de 20 bytes (10 bytes de la trama física y 10 de la trama MAC) se obtiene la siguiente operación: $160 \text{ bits} / 250 \text{ Kbps} = 0.64 \text{ mseg}$.

En total se tendrá una ranura de tiempo de 2.64 mseg por cada transmisión de respuesta. Esta división de tiempo en el canal produce que los nodos centrales se comuniquen con los nodos móviles siguiendo un protocolo tipo Aloha ranurado.

Para evitar esperas del orden de segundos, se está considerando que el número máximo de celdas sea de 16. Con lo cual se tendría que el tiempo máximo de espera en la etapa 3, será de: $15 \times 2.64 \text{ mseg} = 39.6 \text{ mseg}$.

En caso que el nodo móvil no reciba respuesta en un lapso de 39.6 mseg, se considerara que el nodo móvil no está dentro del rango de ningún nodo central.

Los nodos centrales determinan su ranura de tiempo de una manera aleatoria eligiendo un número entre 0 y 15. Entonces, la probabilidad de que ningún nodo coordinador repita el mismo número para transmitir en una ranura en específico, se determina por la siguiente ecuación 1.

$$P_{n,m} = \frac{n!}{(n-m)!n^m} \dots (1)$$

La ecuación 1 se obtiene haciendo la división de la variación sin repetición [38] de los elementos entre el número de combinaciones que se pueden obtener [38].

Donde n es el máximo número de nodos centrales que pueden existir en la red (máximo 16) y m es el número de nodos centrales existentes en la red (que puede variar entre 1 a 16). $P_{n,m}$ mide la probabilidad de que dos o más estaciones no repita el mismo número de ranura diferentes.

La probabilidad de que dos o más nodos centrales no obtengan el mismo número de ranura, se obtiene graficando la ecuación 1 y esta probabilidad se muestra en la figura 5.10.

En las figuras 5.11 y 5.12 se explica el funcionamiento del Hand-Off para el nodo, y en la figura 5.13 el funcionamiento del coordinador.

5.8. Resumen

El mecanismo de Hand-Off es de vital importancia en las tecnologías de telefonía celulares para mantener comunicación constante entre los usuarios sin importar la celda en que se encuentre. Esta idea es la que se utilizará en este trabajo de tesis para demostrar que el mecanismo de Hand-Off puede ser utilizado en redes de sensores como una posible solución para la correcta selección de un nodo coordinador (en el caso de Sensores Móviles) y a su vez evitar una capa superior (capa de Red) para el desarrollo de una aplicación.

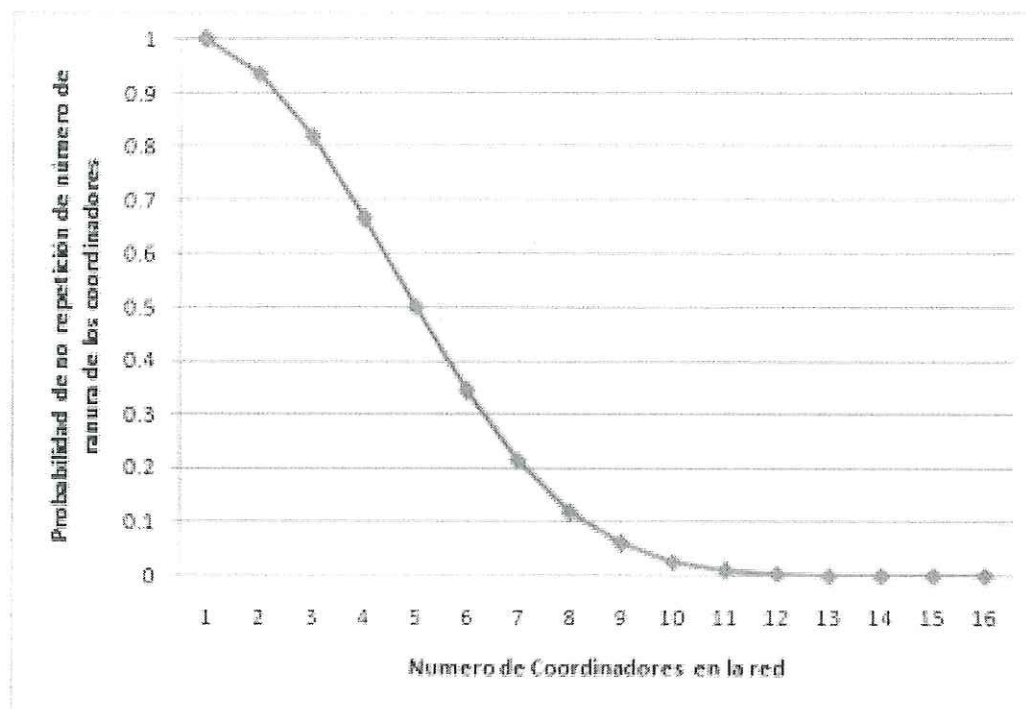


Figura 5.10: Probabilidad de que los nodos centrales no repitan el mismo número de ranura

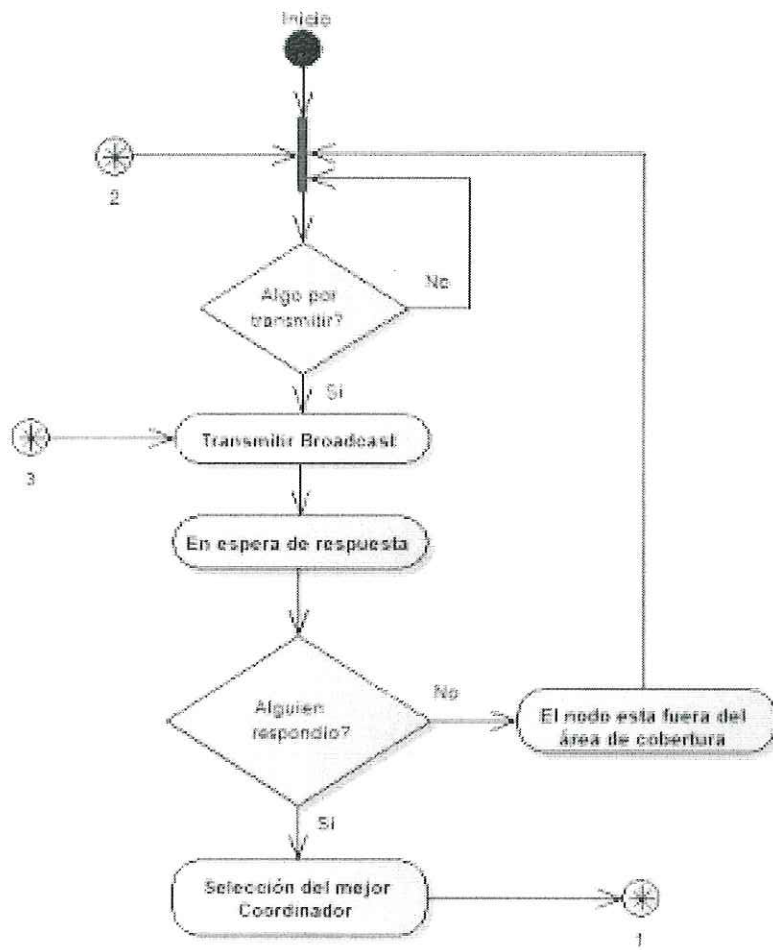


Figura 5.11: Diagrama del nodo

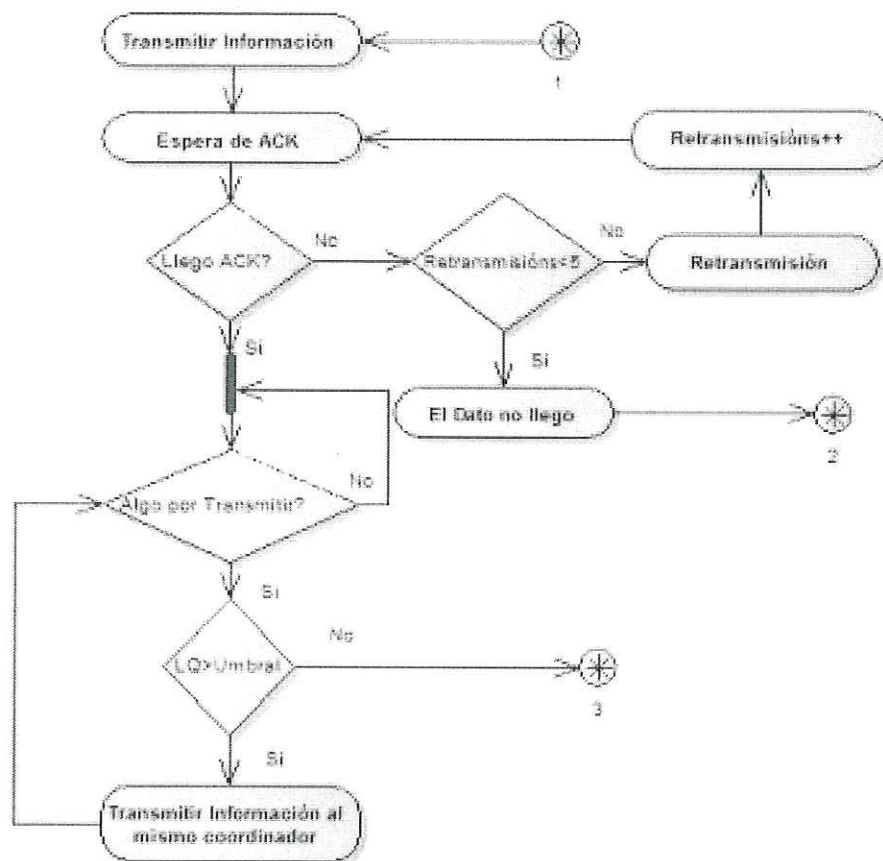


Figura 5.12: Diagrama del nodo, continuaci3n

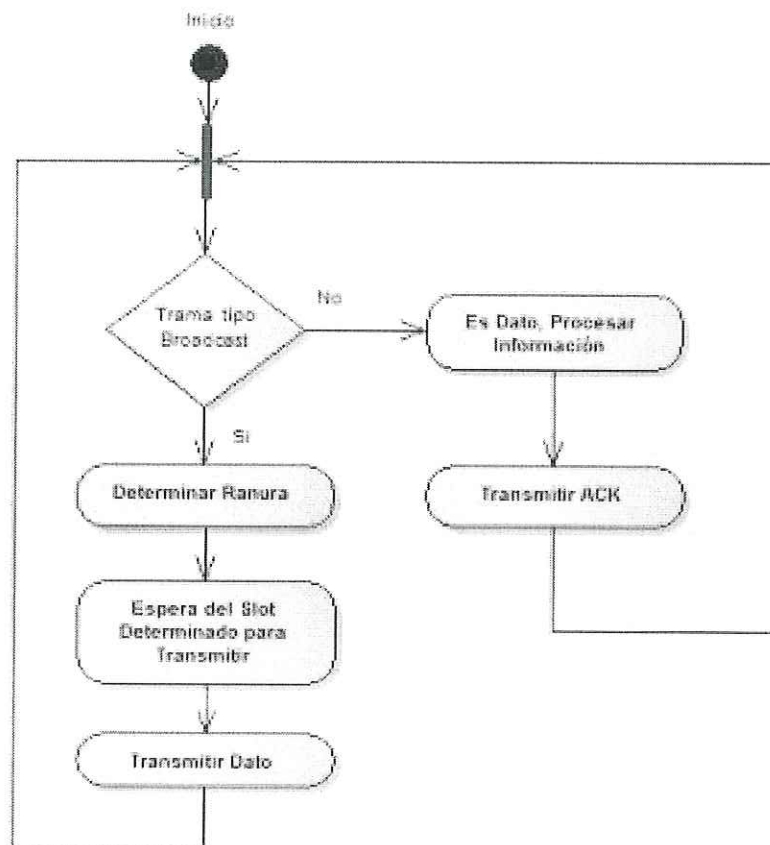


Figura 5.13: Diagrama del coordinador

En este capítulo se determino el área de cobertura para las celdas de las WSN, se realizaron mediciones en ambiente indoor y outdoor y así se obtuvo un valor de potencia mínimo en la recepción que sera el umbral para determinar el área de cobertura de las celdas.

Se diseño una trama nueva para el protocolo Simple-MAC. Esta trama incluyo un byte de control que sirve para administrar el desarrollo de nuestra aplicación. La inclusión de este campo de control en la trama hace mas óptimo el protocolo y el mecanismo de Hand-Off propuesto.

Con lo que respecta a la probabilidad de no repetición de ranura de tiempo para los coordinadores, se demostrará la veracidad con la gráfica obtenida en el capítulo de resultados, y también se comprobará la eficiencia del mecanismo de Hand-Off.

Capítulo 6

Desarrollo de un Puente 802.11-802.15.4

6.1. Introducción

Un puente es un dispositivo que permite interconectar redes que cuenten con protocolos o arquitecturas diferentes entre ellas, es decir, si existen dos redes con diferente arquitectura entre ellos, el puente se encarga de traducir la información que sera enviada de un nodo a otro.

Un puente puede ser implementado entre cualquier tipo de tecnología, ya sea alámbrica-alámbrica, inalámbrica-inalámbrica o la unión de ambas. Este trabaja en la capa 2 del modelo OSI (Capa de enlace de datos), interconectando dos segmentos de red, pasando a su vez los datos de una red hacia otra.

En esta tesis, la tecnología utilizada es la 802.15.4, sin embargo, el área de alcance no es tan amplia como otras tecnologías. Es por este motivo que se busca la necesidad de interconectarla con otra tecnología para ampliar aun más nuestra cobertura, en este caso la tecnología con la que se unirá es la IEEE 802.11. Es por este motivo que se requiere de la implementación de un puente entre 802.15.4 y una tecnología que tenga un área de cobertura suficientemente amplia. El puente que se realizó, se muestra en la figura 6.1.

6.2. Seleccionando el puente

Como se menciona en la sección anterior, un puente se puede realizar entre distintos tipos de tecnologías, ya sea cableada o inalámbrica. Las tecnologías idóneas para realizar el puente son Ethernet y Wi-Fi, ya que ambas tecnologías son las más usadas y con menor problema de instalación.

El usar Ethernet como solución para el puente, implica la instalación de cableado (ya sea par trenzado, fibra óptica o coaxial) y un minucioso análisis para la correcta colocación del mismo cableado. Con la utilización de una infraestructura Wi-Fi, se evita el análisis minucioso de la colocación de los nodos encargados de realizar las labores del puente, esto se debe a que si el nodo no se encuentra en la correcta colocación, basta con moverlo de lugar sin la necesidad de volver a reestructurar el cableado. También cabe resaltar, que usar una tecnología inalámbrica libera la obstrucción de cableado innecesario, y la instalación y mantenimiento de estos dispositivos es más simple, rápido y menos costoso.

Es por estos motivos por los que se considero la utilización de un puente inalámbrico entre los dispositivos 802.15.4 y 802.11. En este caso, la tecnología inalámbrica utilizada para dicho puente, es Wi-Fi, esto gracias a que Wi-Fi (802.11) en la actualidad tiene un gran auge en la vida diaria de las personas, y es la mas utilizada en instituciones, empresas, hospitales, etc, y en estos casos, no es necesario realizar una instalación extra, sino simplemente adaptarse a ella.

6.3. Interfaz

Los módulos PAN802154HAR00, como se menciona en la sección 4.2, cuenta con una interfaz RS232 con la cual el nodo puede comunicarse por el puerto serie de algún dispositivo. Los ejemplos que ya trae incorporado Beekit, ya cuentan con la habilitación del puerto serie para tener una comunicación con la computadora, y de esta manera saber los estados o acciones en las que se encuentra el módulo.

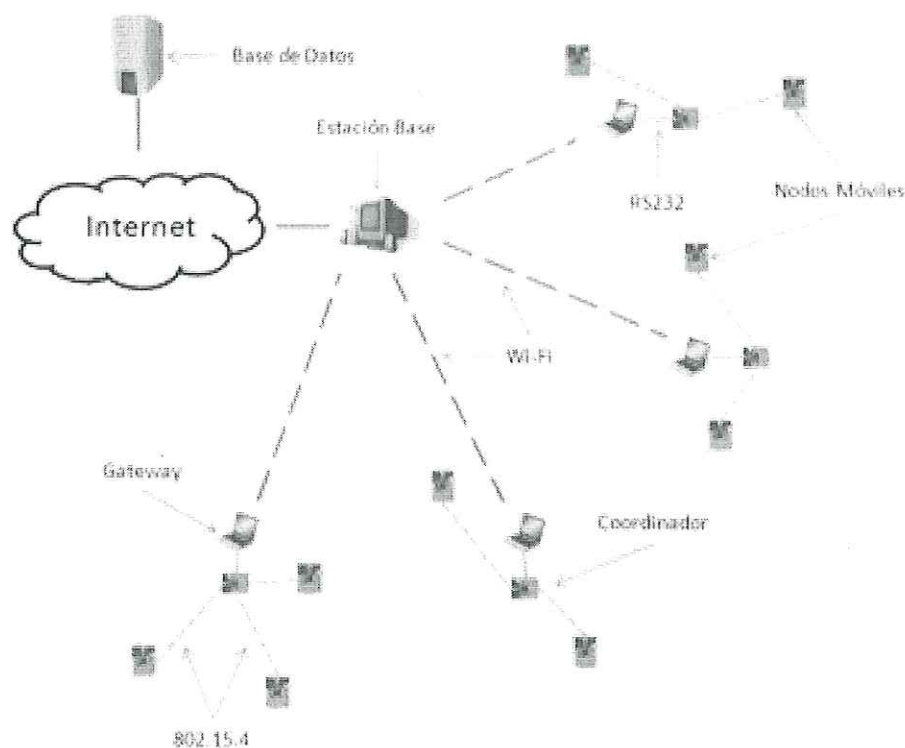


Figura 6.1: Convergencia de una red 802.15.4 y una red 802.11

Al tener una comunicación serie entre una computadora y un módulo, hace falta solamente tener el puente entre la tecnología 802.15.4 y la 802.11. Este puente se puede lograr mediante sockets de programación, ya sea en el lenguaje C, C++, VisualBasic, etc, y así lograr expandir más el área de cobertura de nuestra aplicación. Este puente se realizó en el lenguaje Visual Basic.

En la figura 6.1 se muestra el funcionamiento del puente realizado entre estas tecnologías, se puede ver que los nodos 802.15.4 se encargan de adquirir los datos y transmitirlos al coordinador más cercana, estos a su vez, transmitirlos a una estación base encargada de almacenarlo en una base de datos.

Cabe mencionar, que en este trabajo de tesis solo se implementó el puente entre ambas tecnologías, llegando hasta la comunicación entre los coordinadores y la estación base, la implementación de un repositorio o base de datos se dejó para trabajos posteriores.

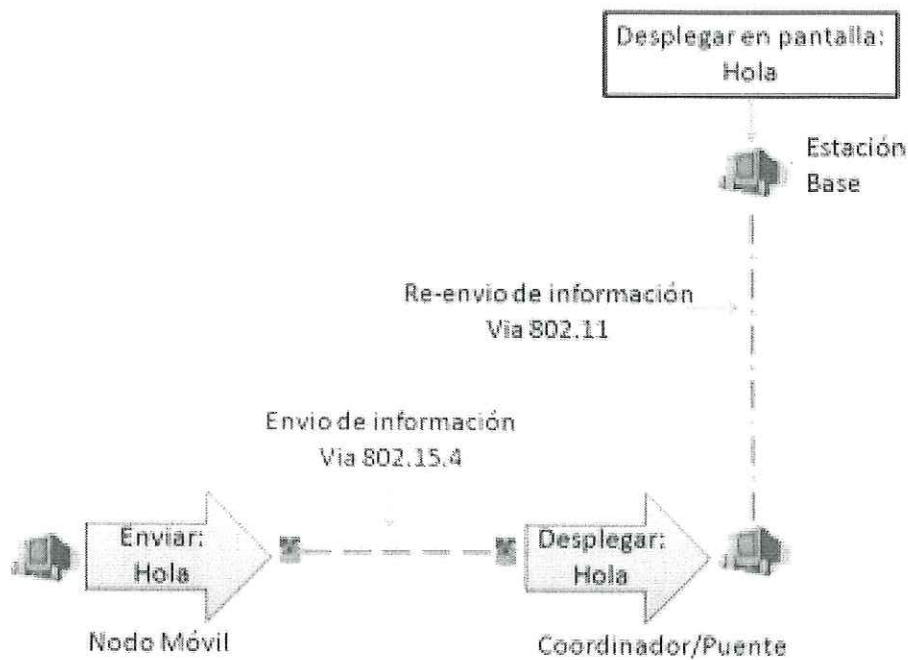


Figura 6.2: Implementación del chat con el puente 802.15.4-802.11

6.4. Funcionamiento del Puente 802.15.4-802.11

Para probar la funcionalidad del puente diseñado, se utilizó una aplicación de tipo chat, en donde la información capturada por un nodo IEEE 802.15.4 pasaba de manera transparente a un nodo IEEE 802.11. A cada nodo móvil y coordinadores se les conectó una computadora por medio del puerto serie, en la computadora de los nodos móviles se podía escribir a manera de chat cualquier tipo de información. Después de capturar la información, esta era enviada por el puerto serie (RS232) de la computadora hacia el nodo móvil. Al llegar la información al nodo móvil, esta la transmitía al coordinador más cercano vía 802.15.4. La información recibida por el coordinador era enviada vía puerto serie a la computadora que tenía conectada, para que esta a su vez apareciera en pantalla. Después de aparecer la información en la pantalla del coordinador, esta misma información era retransmitida a otra computadora vía 802.11 y desplegada en pantalla también (Simulando un repositorio o base de datos). Esto se puede ver a detalle en la figura 6.2

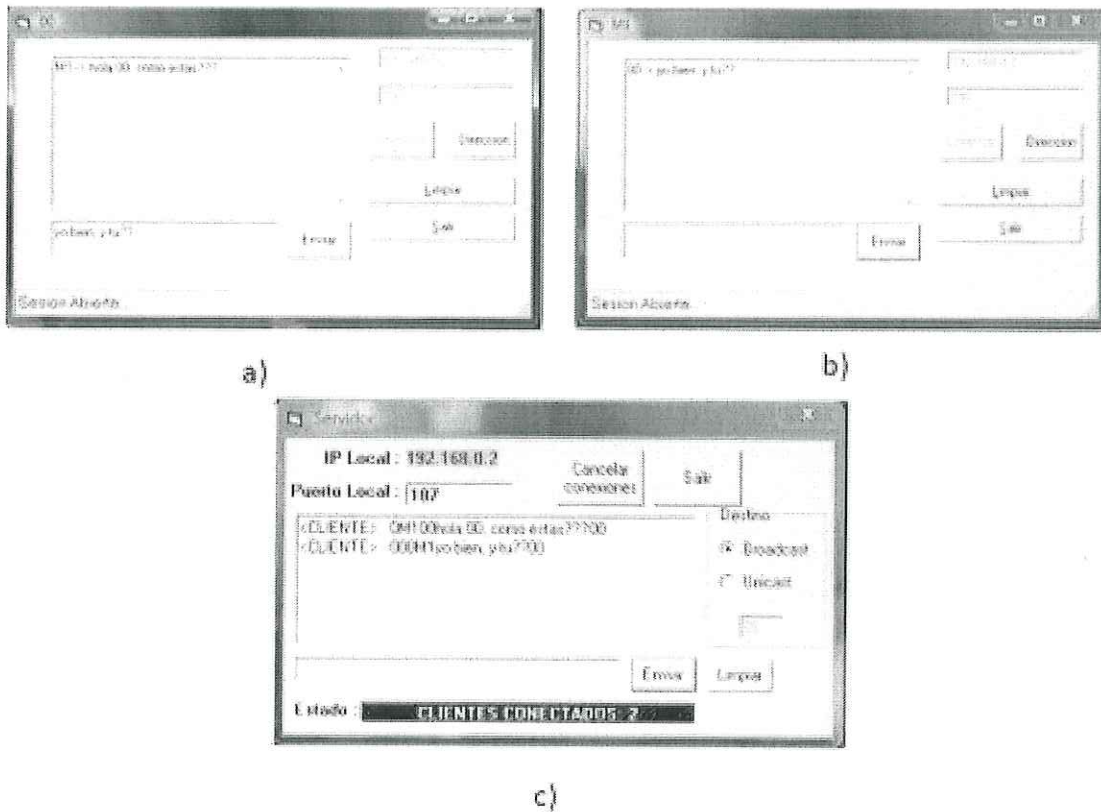


Figura 6.3: a) Coordinador, b) Nodo Móvil, c) Estación Base

Cabe mencionar que la información recabada por la estación base solamente fue mostrada en pantalla y posteriormente desechada. La implementación de un repositorio o base de datos, como se menciono anteriormente, es para un trabajo posterior.

Para probar el correcto funcionamiento del puente implementado, se diseño un chat en base a lo anteriormente explicado en esta sección. En la figura 6.3 se muestra la pantalla para el nodo móvil, para el coordinador y para la estación base. A los nodos se les asigno como dirección dos caracteres, los cuales comenzaron con la letra 'M' (Móvil) y un numero que va desde el 0 al 9. Para los coordinadores se les asigno números que van del '00' al '99'. Esto se realizo con el fin de demostrar que el puente implementado funcione de la manera adecuada. Cabe mencionar que en la implementación del chat el nodo podía mandarle información al coordinador, y el coordinador a los nodos conectados a su celda.

En la figura 6.3 se muestran también los botones para el funcionamiento de la interfaz. El botón Conectar se encarga de hacer la conexión vía socket tipo esclavo - maestro, en donde los esclavos son los 'n' coordinadores de la red, y el maestro es la estación base de toda la red. La conexión se realiza introduciendo la dirección IP de la computadora y el puerto por el cual se realizara la conexión. Con lo que respecta al botón Dirección, es el encargado de hacer petición al nodo 802.15.4 de dirección, es decir, cuando el usuario presiona dicho botón, la interfaz gráfica hecha en Visual Basic manda un trama al modulo PAN802154HAR00 vía puerto serie en donde le pregunta su dirección, este nodo a su vez le responde con otra trama con la dirección de este mismo nodo, esto con el fin de tener una mejor administración de los nodos de la red. El botón Limpiar se encarga borrar el historial de información de la pantalla. El botón Salir cierra la conexión entre el coordinador y la estación base y cierra la pantalla. Con lo que respecta al botón Enviar, es el encargado de mandar la información del coordinador hacia la estación base.

Con la implementación de un puente 802.15.4 - 802.11, queda solucionado el problema de la cobertura de la tecnología 802.15.4. El trabajo posterior para esta implementación queda en la necesidad de desarrollar un repositorio en el cual se almacene toda la información captura por la red, y que esta después pueda ser accesada y administrada para el uso deseado.

A continuación se mostrara el pseudocódigo del puente 802.15.4-802.11.

Pseudocódigo del Nodo Móvil

- 1.-Se abre puerto RS232
- 2.-Si no hay nada por enviar, ir al paso 4
- 3.-Enviar datos por RS232 al nodo móvil
- 4.-Si no salio del programa, ir al paso 2
- 5.-Cerrar puerto RS232
- 6.-Salir

Pseudocódigo del Coordinador

- 1.-Se abre puerto RS232
- 2.-Se abre el puerto del Socket
- 3.-Conectarse con Estación Base
- 4.-Si no se conecto, ir al paso 10
- 5.-Leer puerto RS232
- 6.-Si no llego dato de RS232 ir al paso 9
- 7.-Desplegar datos en pantalla
- 8.-Reenviar datos por el puerto del Socket vía 802.11
- 9.-Si no salio del programa, regresar al paso 5
- 10.-Cerrar puerto RS232
- 11.-Cerrar socket
- 12.-Salir

Pseudocódigo de la Estación Base

- 1.-Se abre el puerto del Socket
- 2.-Si no hay petición de conexión de coordinadores, ir al paso 4
- 3.-Conectar con coordinador
- 4.-Si no llego información del puerto del Socket, ir al paso 6
- 5.-Desplegar información en pantalla
- 6.-Si no salio del programa, regresar al paso 2
- 7.-Cerrar conexiones con coordinadores, y cerrar socket
- 8.-Salir

6.5. Resumen

En este capítulo se presento la necesidad de tener un puente que uniera la tecnología tecnología 802.15.4 con una más robusta como es 802.11 (Wi-Fi). Cabe mencionar que el puente puede realizarse por medio de una tecnología alámbrica (como

Ethernet), o también por medio de la telefonía celular, esto con el fin de cubrir áreas mucho mas amplias que la misma tecnología Wi-Fi.

Con la implementación de un chat entre la tecnología 802.15.4 y la 802.11, se demostró que el puente tuvo el funcionamiento correcto, y que únicamente sería necesario el desarrollar una base de datos para complementar la aplicación.

Capítulo 7

Resultados

7.1. Introducción

En este capítulo se mostraran los resultados de la implementación del mecanismo de Hand-Off. Estas mediciones son importantes para demostrar que la implementación de un mecanismo de Hand-Off en las WSN es una solución óptima para expandir su área de cobertura y así evitar incluir una capa de enrutamiento.

En el transcurso de este capítulo se explicará cada uno de los resultados obtenidos por cada medición realizada a las mediciones.

Para medir el funcionamiento y eficiencia del mecanismo de Hand-Off, se definieron las siguientes métricas:

1. Porcentaje de conexión permanente a un coordinador. Esta métrica muestra el porcentaje en la que el nodo se quedo conectado al coordinador con el que ha establecido una conexión previa, sin la necesidad de enviar peticiones de conexiones a los coordinadores presentes en la WSN. El porcentaje se obtiene al dividir la resta del total de paquetes enviados menos el envío de broadcast del nodo móvil entre el total de paquetes enviados del nodo móvil a los coordinadores, por ejemplo: se enviaron 9970 exitosos del nodo móvil a los coordinadores, de los cuales, 2000 paquetes llegaron a los coordinadores con una petición de conexión anterior al envío, entonces se realiza la siguiente operación $(9970 - 2000) / 9970 * 100$ (se multiplica por 100 para obtener un porcentaje en escala de

0 a 100) dando un total del 79.94 %.

2. Broadcast: Esta métrica arroja el promedio de broadcast enviados del nodo móvil a los coordinadores, con esta métrica sabemos cuantas peticiones de conexión existió por parte del nodo móvil. El porcentaje se obtiene de la diferencia entre el 100 por ciento menos el Porcentaje de conexión permanente a un coordinador, por ejemplo, si tenemos un total del 79.94 % de conexión permanente, se hace la siguiente operación: $100 - 79.94 \%$, dando un total del 20.06 %.
3. Porcentaje de conexión al coordinador más cercano. Esta métrica muestra el porcentaje de las ocasiones en la que el nodo móvil se conecta al nodo coordinador mas cercano. Es importante debido a que podemos saber que tan equitativas son las ocasiones a las que se conecta el nodo móvil a los coordinadores.
4. %Paquetes perdidos. Con esta métrica se verifican los paquetes que se perdieron, ya sea por interferencias o perdida en la potencia. Este porcentaje se obtiene restando el numero de paquetes que se enviaron al aire menos el numero total de paquetes recibidos por los coordinadores entre el numero total de paquetes que se enviaron, por ejemplo: se enviaron 10000 paquetes al aire, de los cuales solo 9980 llegaron a su destino, entonces se realiza la siguiente operación: $(10000 - 9980) / 10$, dando un resultado del 0.20 %.
5. Fuera del umbral. Esta métrica indica cuando el nodo móvil se encuentra fuera del alcance de todos los coordinadores. Esto puede ocurrir debido a que el nodo móvil esta muy lejos de los coordinadores o por potencias bajas en la comunicación. Esta métrica se mide con los paquetes enviados con una potencia por debajo de los -85dBm (Umbral calculado en la sección 5.6).
6. Diferente ranura. Con esta métrica se sabe el porcentaje de las veces en que los coordinadores seleccionan diferente ranura de tiempo entre ellos.

7. Misma ranura. Esta métrica a diferencia de la métrica Diferente ranura, muestra el porcentaje de ocasiones en que los coordinadores repiten la misma ranura de tiempo al momento de transmitir respuesta a los coordinadores, en otras palabras, equivale a una colisión en la transmisión.
8. Solo un coordinador respondió. Con esta métrica se determinan los porcentajes en que solamente un coordinador respondió a la petición, cuando un coordinador no responde, quiere decir que el nodo móvil se encuentra fuera del área de cobertura del coordinador o también por interferencias o baja potencia en la transmisión.

Para calcular las métricas de Diferente ranura, Misma Ranura y la de Solo un coordinador respondió, se obtienen desplegando en pantalla las ranuras seleccionadas por los coordinadores y visualizando las ocasiones en que las ranuras repetían, no repetían o cuando solamente uno de ellos respondió, cuando ninguno respondía, se considero que el nodo móvil se encontró fuera del umbral.

7.2. Escenarios

Para probar la operación del mecanismo de Hand-Off implementado y obtener resultados, se realizó un experimento que consistió en colocar dos coordinadores con una separación de 20 metros uno del otro (dándole al coordinador un área de cobertura de 10 metros) y poner un nodo móvil entre ambos coordinadores, como se muestra en la figura 7.1. En donde C1 es el coordinador 1 y C2 es el coordinador 2.

La primera medición consistió en colocar un nodo móvil en la muñeca de una persona, esta persona camina en el área de cobertura del coordinador 1 sin salirse de esta. La persona camina de 0 a 8 metros de distancia del coordinador 1 de ida y vuelta, como se muestra en la figura 7.2, esto con el fin de demostrar que el nodo móvil se quedaría conectado la mayoría de las veces al coordinador 1.

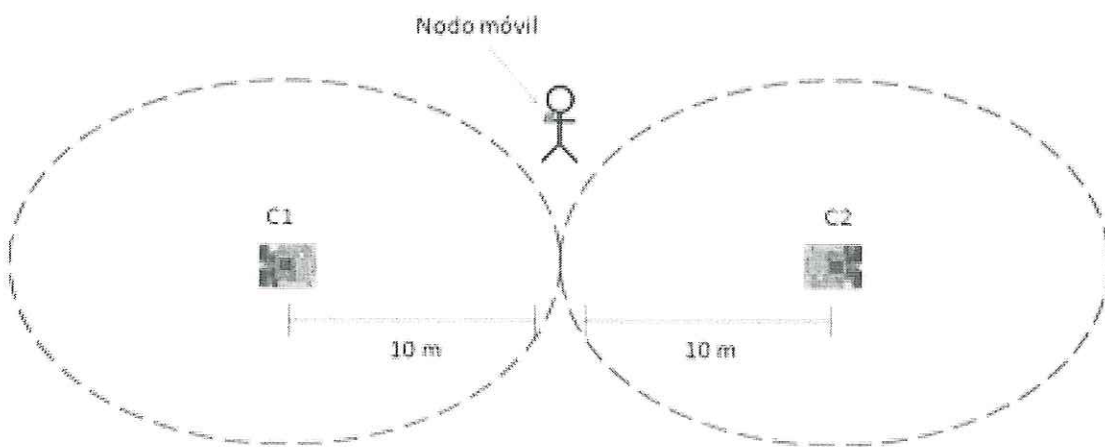


Figura 7.1: Topología del Experimento

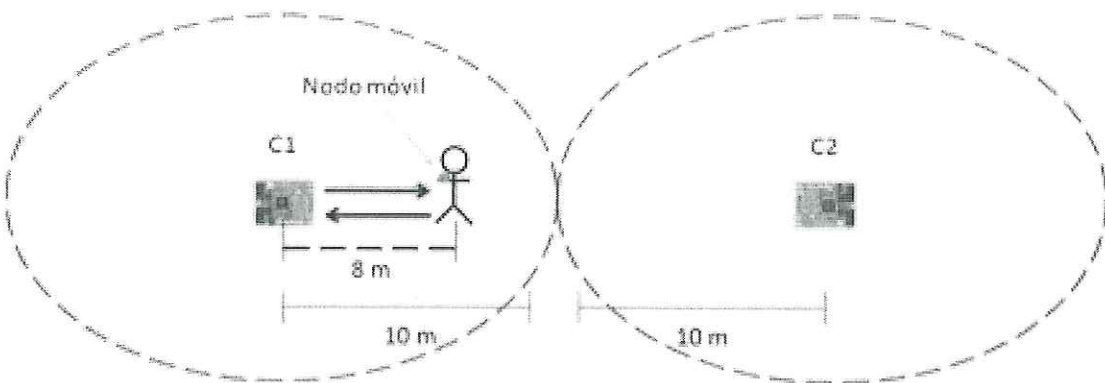


Figura 7.2: Topología de medición de 0 a 8 metros de C1

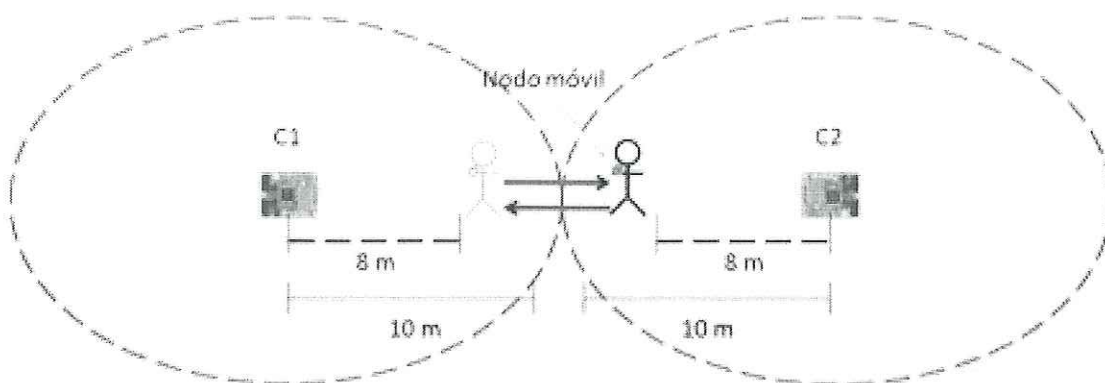


Figura 7.3: Topología de medición del umbral de los 8 metros de C1 y C2

La segunda medición siguió las mismas características de la primera medición, a diferencia de que la persona entró y salió del área de cobertura de ambos coordinadores, es decir, la persona empezó a caminar en línea recta a partir de los 8 metros de distancia del coordinador 1, y por lógica, a 12 del coordinador 2, hasta llegar a 8 metros del coordinador 2, y por ende a 12 del coordinador 1. Cabe mencionar que la persona también camina de ida y vuelta como, esto se puede observar en la figura 7.3.

Para cada escenario, se realizaron 2 tipos de mediciones, una con un manejo de histéresis (mencionado en la sección 5.7) y otra sin manejo de histéresis. Estas dos mediciones realizadas son con la finalidad de demostrar que con manejo de histéresis se evitan las conexiones innecesarias, ayudando en el menor gasto de energía posible para los nodos móviles.

7.3. Resultados

Los resultados que se muestran a continuación son los obtenidos con el manejo de histéresis. Se mide las veces que el nodo móvil mando broadcast a los coordinadores para la petición de conexión. Por cada medición se enviaron 10000 paquetes hacia el coordinador. En la figura 7.4 se muestran las veces que el nodo móvil mando broadcast y las veces que se quedó conectado a un coordinador.

Se puede notar que en las mediciones de 0 a 8 metros del coordinador 1 existie-

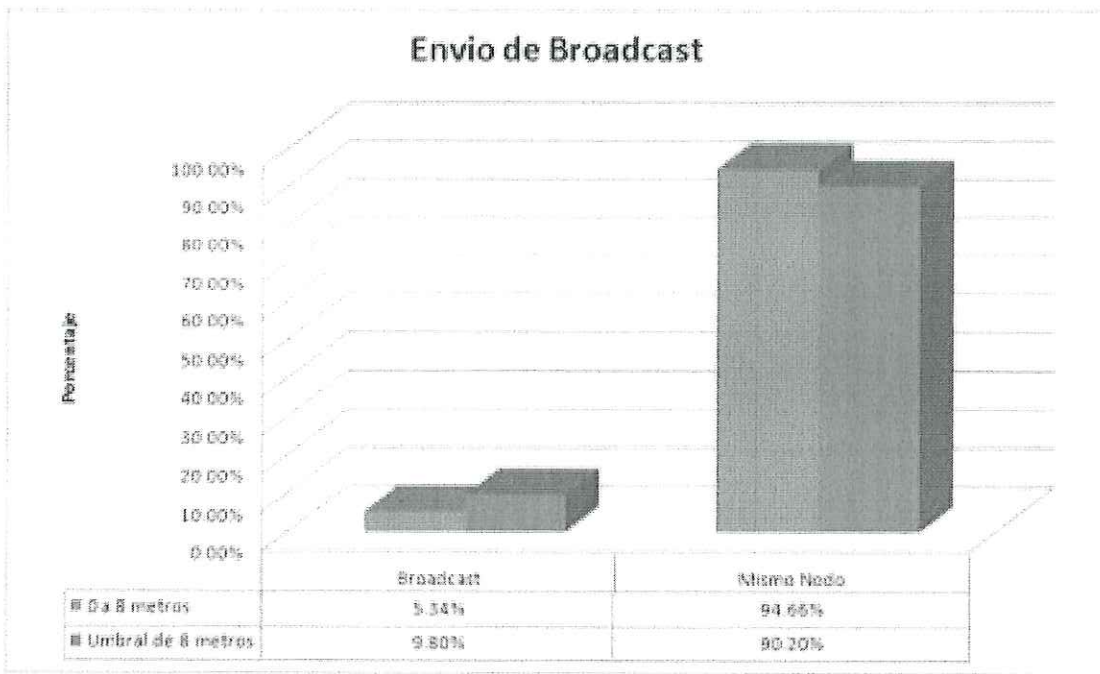


Figura 7.4: Envío de Broadcast, con Histéresis

ron menos envíos de broadcast que en la medición del umbral de los 8 metros de ambos coordinadores. Algo mas que hay que resaltar, es que en el umbral existieron mas paquetes perdidos, esto a consecuencia del umbral de potencia que se propuso (Umbral de -85dBm).

En la figura 7.5 se muestran las veces que se conecto tanto al coordinador 1(C1), como al coordinador 2(C2), como puede verse, en las mediciones de 0 a 8 metros del C1, el nodo móvil se conecto en poco más del 90 % al C1 que al C2, y como era de esperarse, en el umbral de los 8 metros, existió una equidad en las veces que se conecto a ambos coordinadores.

En la figura 7.6 se muestran los resultados de las veces que los coordinadores seleccionaron, ya sea la misma ranura de tiempo o diferente ranura, se puede ver que las veces que selecciono la misma ranura no fue un porcentaje tan amplio, es decir, se obtuvo un promedio de 4.15 % en mediciones de 0 a 7 metros y un 3.42 % en el umbral de los 8 metros.

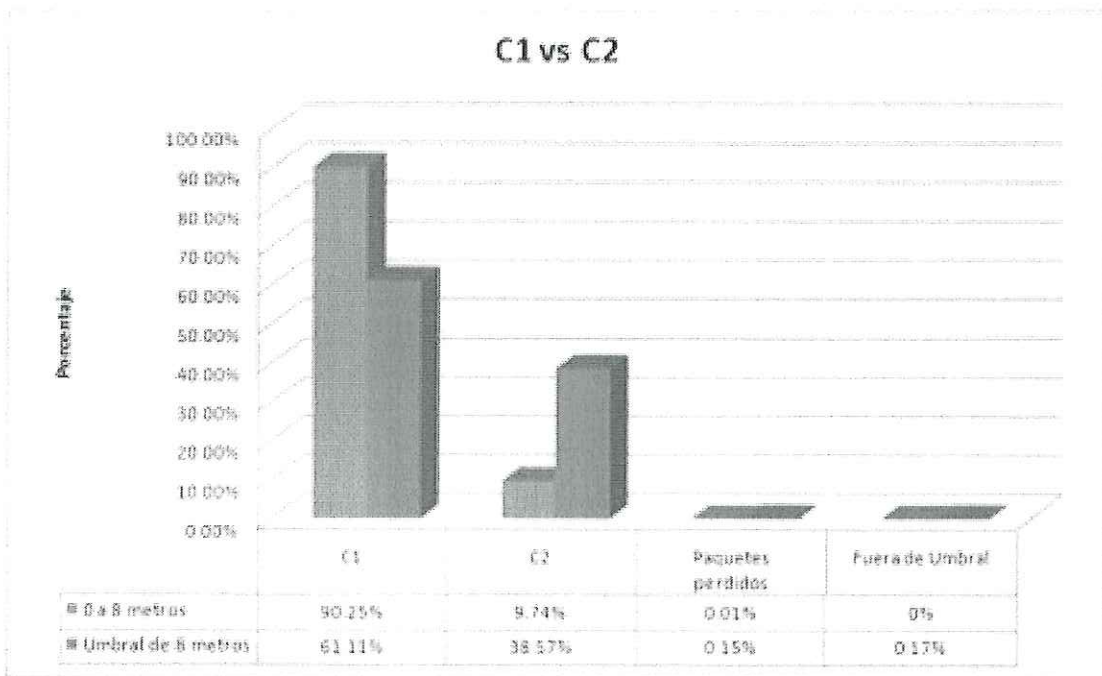


Figura 7.5: Conexión a Coordinadores, con Histéresis

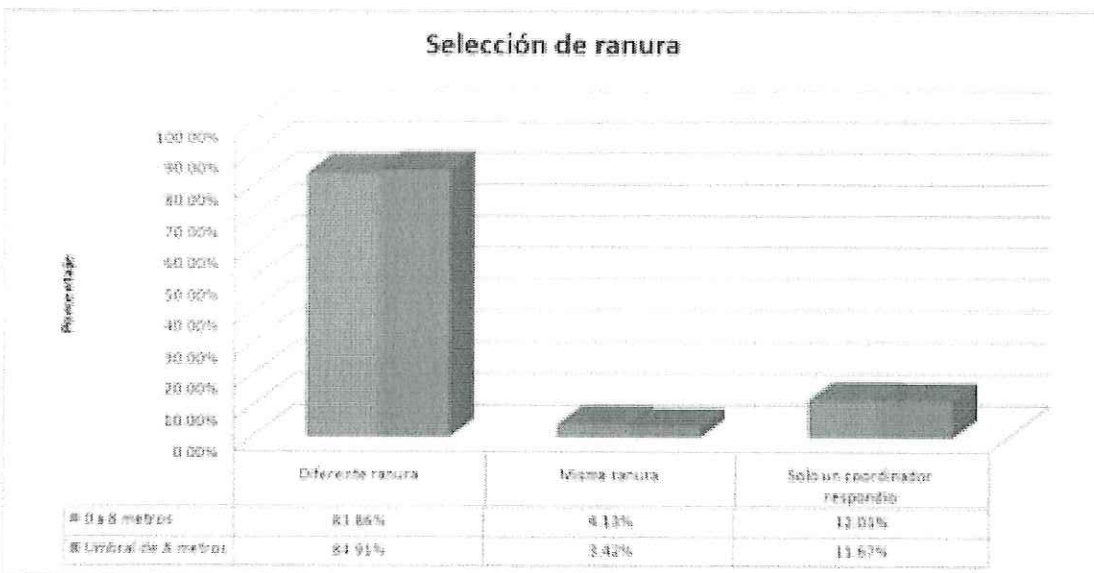


Figura 7.6: Selección de ranura por parte de los Coordinadores, con Histéresis

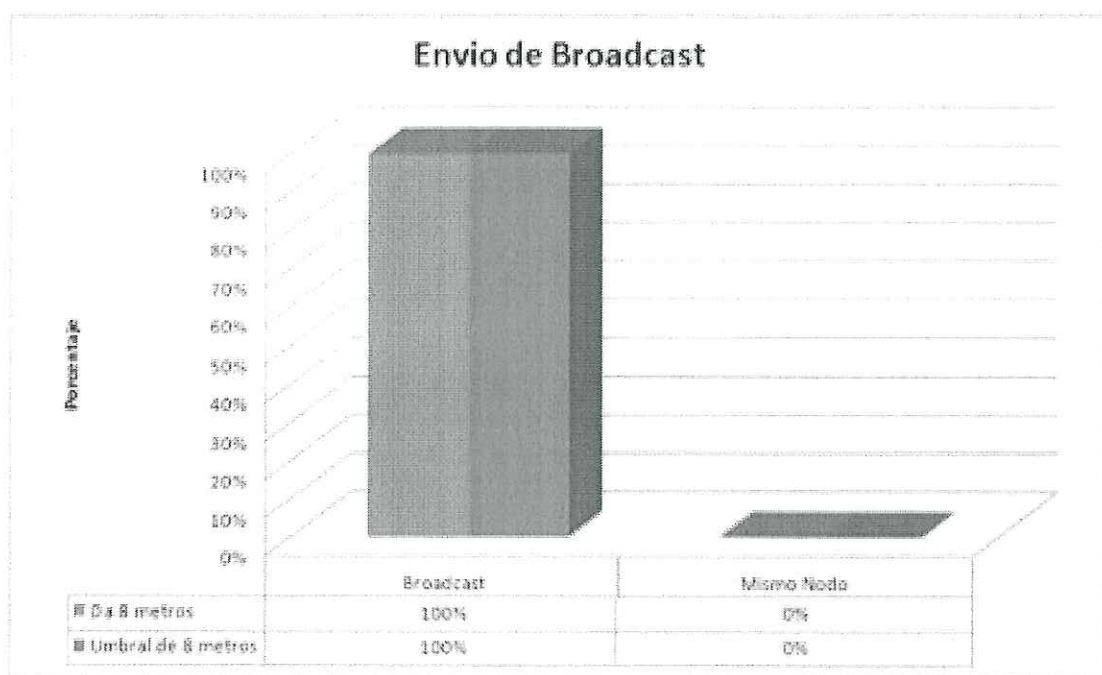


Figura 7.7: Envío de Broadcast, sin Histéresis

A continuación se muestran los resultados obtenidos de los mismos dos escenarios planteados en la sección 7.2. En estas mediciones no se utilizó el manejo de histéresis. También se enviaron 10000 paquetes hacia los coordinadores. En la figura 7.7 se muestran las veces que el nodo móvil envió broadcast a los coordinadores. Como se puede ver, el nodo móvil envió en un 100 % de las veces el broadcast, esto por la razón de que el nodo móvil no maneja histéresis.

En la figura 7.8 se muestran los resultados de las ocasiones en que el nodo móvil se conectó al coordinador más cercano, con lo que respecta a la distancia de 0 a 8 metros de C1, el nodo móvil se conectó en su mayoría a C1, esto por que la potencia de este coordinador fue casi siempre mayor que la de C2 que se encontraba a mas de 12 metros de distancia. Para las mediciones del umbral de los 8 metros de las celdas, el nodo siguió un patrón lógico de equivalencia de las conexiones. Existió una diferencia de aproximadamente de 2 terceras partes de la veces de las conexiones a C1 y de 1 tercera parte a C2 debido a la propagación de la señal y las circunstancias del am-

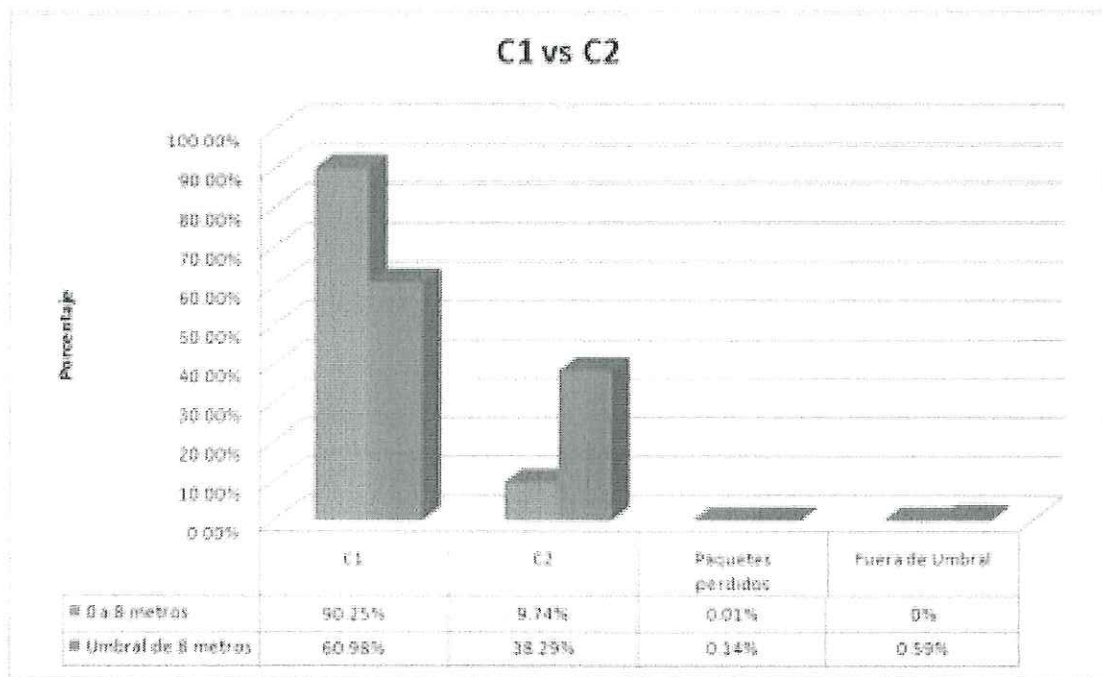


Figura 7.8: Conexión a Coordinadores, sin Histéresis

biente y la ambientación.

Con respecto a las repeticiones de ranuras de los coordinadores, estas siguieron un comportamiento muy parecido a las mediciones con histéresis, véase figura 7.9.

7.4. Análisis de los resultados

Los resultados muestran que el mecanismo de Hand-Off propuesto es eficiente, debido a que en su mayoría de peticiones de conexión del nodo móvil al coordinador mas cercano, el móvil realizo esta tarea de manera eficiente. Además los paquetes perdidos fueron muy pocos, de manera que el rango de dichos paquetes perdidos se encontró dentro del 1.0% de perdida de paquetes que maneja tanto el fabricante (Freescale) como el estandar.

Con lo que respecta a la selección de la ranura, el promedio de selección de la misma ranura se encontró por debajo de lo calculado en la sección 5.7. Esto evita colisiones por parte de los nodos coordinadores y logra que los nodos móviles obtengan

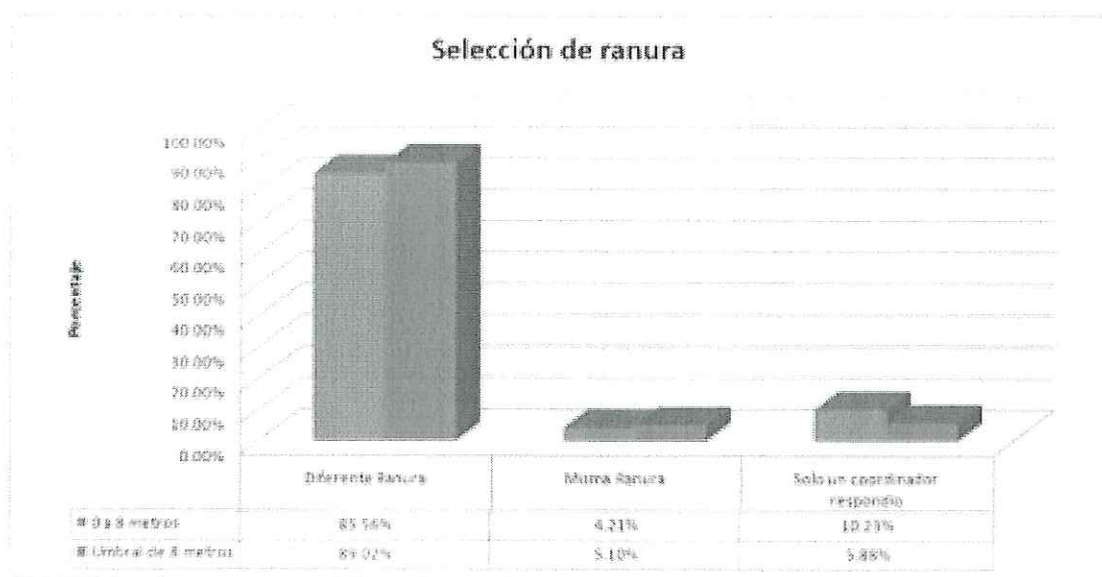


Figura 7.9: Selección de ranura por parte de los Coordinadores, sin Histéresis

una respuesta rápida y así reducir la perdidas de paquetes. Logrando así tener un método de acceso al medio tipo aloha ranurado con colisiones relativamente menores.

Otro punto que cabe resaltar, es que la estrategia de implementar una función de histéresis al momento de mandar un broadcast del nodo móvil a los coordinadores, hizo que disminuyera considerablemente las ocasiones en que el nodo móvil envió petición de conexión, haciendo aún más eficiente la propuesta del mecanismo de Hand-Off planteada en esta tesis.

7.5. Resumen

En este capítulo se presentaron los escenarios planteados para la obtención de los resultados del mecanismo de Hand-Off propuesto. Se pudo ver la descripción de los dos escenarios planteados, así como los dos tipos de mediciones que se realizaron (una medición con manejo de histéresis y otra sin el manejo de histéresis). En cada una de las mediciones realizadas se mandaron 10000 paquetes del nodo móvil a los coordinadores.

Con los resultados que se muestran, tanto del mecanismo de Hand-Off sin histéresis como del mecanismo de Hand-Off con histéresis, se sabe que la mejor manera

de utilizar el mecanismo de Hand-Off es utilizando histéresis, ya que así se evitan las conexiones innecesarias, se ahorra energía y consumo de recursos de procesamiento.

Capítulo 8

Conclusiones Finales

En este trabajo se mostraron los resultados de diseñar e implementar un mecanismo de Hand-Off para WSN que operan con el estándar IEEE 802.15.4. El mecanismo de Hand-Off se diseñó por encima del protocolo de acceso al medio llamado Simple-MAC.

Los resultados obtenidos muestran que el mecanismo de Hand-Off propuesto puede ser implementado en aplicaciones reales con una eficiencia de conexión del 99.99 % en la distancia de 0 a 8 metros al nodo coordinador y un 99.68 % en el umbral de los 8 metros.

Con lo que respecta a la pérdida de paquetes, existió un 0.01 % para la distancia de 0 a 8 metros y un 0.15 % para el umbral de los 8 metros, lo cual comprueba que puede operar eficientemente para expandir el área de cobertura de las WSN sin la necesidad de incluir una capa de enrutamiento en el mismo nodo sensor.

Esto trae como beneficios la liberación de recursos que pueden ser utilizados por la aplicación y la reducción de la pila de protocolos para las redes de sensores, como se muestra en la figura 8.1.

Ensenada B.C, Noviembre del 2008

JOSÉ RAFAEL MUÑOZ ORTIZ

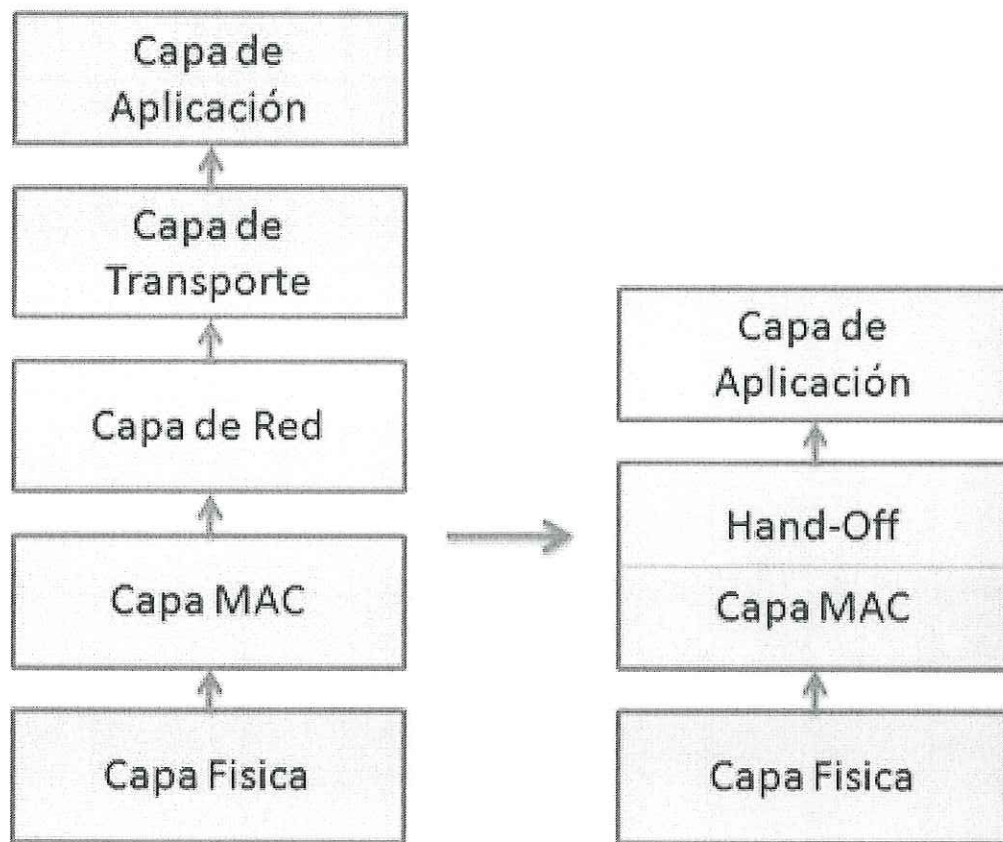


Figura 8.1: a) Pila de protocolos de las WSN, b) Simplificación de la pila

Bibliografía

- [1] Ian F. Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Sankarasubramaniam and Erdal Cayirci *A Survey on Sensor Networks*, IEEE Communications Magazine, Agosto, 2002. pp. 102-112. (p: 30)
- [2] Ilker Demirkol, Cem Ersoy and Fatih Alagoz, *MAC Protocols for Wireless Sensor Networks: A survey*, IEEE Communications Magazine, Abril, 2006. pp. 115-121. (p: 21)
- [3] Wei Ye, John Heidemann and Deborah Estrin *Medium Access Control With Coordinated Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networks*, IEEE/ACM Transactions on Networking, numero 3, Vol. 12, Junio, 2004. pp. 493-506. (p: 33)
- [4] Jaesub Kim, Keuntae Park, Jeong-Hun Shin and Daeyeon Park *Look/Ahead Scheduling for Energy/Efficiency and Low/Latency in Wireless Sensor Networks*, Proceedings of the 3rd ACM international workshop on Performance evaluation of wireless ad hoc, sensor and ubiquitous networks, 2006. pp. 141-144. (p: 35)
- [5] El-Hoiydi and J.D. Decotignie *WiseMAC: An Ultra Low Power MAC Protocol for the Downlink of infrastructure Wireless Sensor Networks*, In the Proceeding of the Ninth IEEE Symposium on Computers and Communication, Junio, 2003. pp. 244-251. (p: 37)
- [6] A. El-Hoiydi *Spatial TDMA and CSMA with Preamble Sampling for Low Power Ad Hoc Wireless Sensor Networks*, Proceedings of the 4th international symposium on Information processing in sensor networks, Julio, 2002. pp. 685-692. (p: 37)
- [7] Christian C. Enz and Amre El-Hoiydi and Jean-Dominique Decotignie and Vincent Peiris *WiseNet: An Ultralow-Power Wireless Sensor Network Solution*, IEEE Communications Magazine, numero 8, vol. 37, Agosto, 2004. (p: 38)
- [8] El-Hoiydi, J.-D. Decotignie, C. Enz and E. Le. Rous *Poster Abstract: WiseMAC, An Ultra Low Power MAC Protocol for the WiseNET Gíreles Sensor Netwok*, Proc. 1st ACM SenSys Conf., Noviembre, 2003. pp. 302-303. (p: 38)
- [9] T. V. Dam and K. Langendoen *An Adaptive Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks*, 1st ACM Conf. Embedded Networked Sensor Sys., Los Angeles, CA, Noviembre, 2003. (p: 40)
- [10] P. Lin, C. Qiao and X. Wang *Medium Access Control with a Dynamic Duty Cycle for Sensor Networks*, IEEE WCNC, vol. 3, Marzo, 2004. pp. 1534-39. (p: 40)

- [11] Roque Saenz Peña *Teoría de las Telecomunicaciones*, Departamento de Ciencia y Tecnología, Universidad Nacional de Quilmas. (p: 47)
- [12] Raphael Rom, Moshe Sidi *Multiple Access Protocols, Performance and Analysis*, (p: 19)
- [13] Kyle Bryson, Alison Chen, and Allen Wan *FDMA vs. TDMA vs. CDMA: What's the difference?*, <http://www.owl.net.rice.edu>, 2001.
- [14] ZigBee Alliance , www.zigbee.org. (p: 25)
- [15] Protocolos de Control de Acceso al Medio Evolución y Adaptación a Redes de Sensores , <http://www.dsi.uclm.es/descargas/thechnicalreports/DIAB-06-07-1/mac.pdf>.
- [16] Evans-Pughe, C, *Bzzzz zzz [ZigBee wireless standard]*, IEE Review, vol. 49, Marzo, 2003, pages 28-31.
- [17] Ching-Chin Lin, Ming-Jang Chiu, Chun-Chieh Hsiao, Ren-Guey Lee and Yhu Show Tsa *Wireless Health Care Service System for Elderly With Dementia*, IEEE Transaction on Information Technology in Biomedicin, vol. 10, Octubre, 2006. pp. 696-702. (p: 17)
- [18] Yang Xiao, Xuemin Shen, Bo Sun and Lin Cai *Security and Privacy in RFID and Applications in Telemedicine*, IEEE Communications Magazine, Abril, 2006. pp. 64-72. (p: 17)
- [19] IEEE Computer Society *IEEE Std 802.15.4*, Revision of IEEE Std 802.15.4-2003, 2003. pages 670. (p: 22)
- [20] IEEE Computer Society *IEEE Std 802.15.4*, Revision of IEEE Std 802.15.4-2006, Septiembre, 2006. pages 323. (p: 22)
- [21] F. Martin Pirchio, P. Julian, W. Villalba, F. Masson, P.S. Mandolesi, M. Di Federico, M. Cipolleti *Redes de Sensores Hospitalarias: Estudio Sobre el Hospital Privado del Sur de Hahía Blanca*, Instituto de Investigación en Ingeniería Eléctrica, Universidad Nacional del Sur, Reporte Técnico.- 001-2006, Marzo, 2006. pages 16. (p: 18)
- [22] Realtek Semiconductor co. *RTL8019AS DataSheet*, www.realtek.com.tw, Agosto, 2005. (p: 20)
- [23] Panasonic *2.4 GHz Low Power Module for the IEEE802.15.4 Standard Application Notes*, Rev A3, Pages 31, Noviembre. 2005. (p: 20)
- [24] José Manuel González Cota *Tutorial de Redes de Computadoras*, <http://sistemas.itlp.edu.mx/tutoriales/redes/>, Redes Remotas: Modelo OSI, 10 de Noviembre de 1998.
- [25] Panasonic Electronic Devices Co., Ltd. *Specifications PAN802154HARx0*, 151-ENW-0357, Mayo. 2007. (p: 44)
- [26] Panasonic *2.4 GHz Low Power Module for the IEEE802.15.4 Standard Application Notes*, Pages 6. (p: 43)

- [27] Panasonic Industrial Company *ZigBee Comm Module IEEE802.15.4, Performance Specifications, Summary*, Doc Numero: PANASONICCOFS, Rev 0, Pags 2, 2005. (p: 43)
- [28] Freescale Semiconductor *BeeKit Wireless Connectivity Toolkit, User's Guide*, BKWCTKUG Rev. 1.0, Pags 47, Marzo. 2007. (p: 47)
- [29] Freescale Semiconductor *Simple Media Access Control (SMAC), User's Guide*, SMACRM Rev. 1.4, Pags 56, Octubre. 2006. (p: 47)
- [30] Freescale Semiconductor *802.15.4 Media Access Controller (MAC) MyWirelessApp, User's Guide*, 802154MWAUG Rev. 1.2, Pags 68, Marzo 2008. (p: 47)
- [31] Rogelio Reyna Mark Williams *BeeStack ZigBee: Software Stack Hands-on Training*, AE327, Pags 73, 2007. (p: 51)
- [32] www.panasonic.com/industrial/components (p: 47)
- [33] <http://www.freescale.com/codewarrior> . (p: 52)
- [34] Freescale Semiconductor *Codewarrior Development Tools*, Document Number: CODEWARRIORPRDS REV 0, 2007. (p: 52)
- [35] <http://www.gsmworld.com/> (p: 53)
- [36] Renzo Mare, *Introducción a la Telefonía Celular*, Area de Comunicaciones Electricas, Facultad de Ciencias Exactas, Ingenieria y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario, Pags 24, 2003. (p: 55)
- [37] IEEE Computer Society, *IEEE Std 802.11*, Revision of IEEE Std 802.11-1999, Junio 2007, pags 1232. (p: 62)
- [38] Paulo Alfonso Lopes, *Probabilidad y Estadística*, Pearson Educación, Pags 298, 2000.
(p: 65)
- [39] Freescale Semiconductor, *MC13192 2.4 GHz Low Power Transceiver for the IEEE 802.15.4 Standard*, Rev. 3.2, Pags 24, 2005. (p: 46)
- [40] Freescale Semiconductor, *MC9S08GT60 Data Sheet*, MC9S08GB60/D Rev 2.3, Diciembre. 2004. (p: 45)
- [41] Gonzalo Delgado Huitrón and Jaime Herrero Gallardo, *SMAC Wireless connectivity made easy*, Pags 67-69. (p: 47)
- [42] Victor Shnayder, Borrong Chen, Konrad Lorincz, Thaddeus R. F. FulfordJones y Matt Welsh *Sensor Networks for Medical Care*, Reporte Tecnico TR-08-05, División de Ingenieria y Ciencias Aplicadas, Universidad de Harvard, 2005. (p: 18)

Φ

Glosario

IEEE: *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, Instituto de Ingenieros Electricos y Electronicos. Es una institución profesional mundial encargada de estandarizar.

ISO: *International Organization for Standardization*, Organización Internacional para la Estandarización. Organismo encargado de promover el desarrollo de normas internacionales para industrias, comercios y las comunicaciones.

MAC: *Medium Access Control*, Control de Acceso al Medio. Es una de las subcapa de la capa de enlace de datos del modelo OSI y se encarga de controlar el acceso al medio de los nodos, este determina quien y cuando transmitira el nodo.

OSI: *Open System Interconnection*, Modelo de Referencia de Interconexión de Sistemas Abiertos. Modelo de red Creado por la ISO para definir arquitecturas de interconexión de sistemas de comunicación.

RFID: *Radio Frequency ID*, Identificador de Radio Frecuencia. Es un dispositivo pequeño de Radio Frecuencia que sirven para obtener información de un articulo, animal o persona a travez de peticiones, el funcionamiento es mu similar a los codigos de barras.

SINK: Estación Base de una red de sensores, es el dispositivo por medio del cual pasa toda la información que se esta transmitiendo en la red.