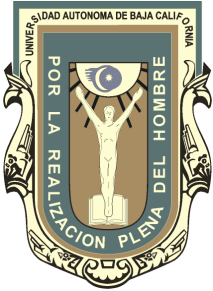
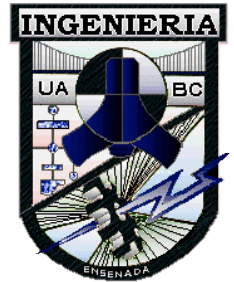


# Universidad Autónoma de Baja California



Facultad de Ingeniería - Ensenada



## Sistema de telemetría de bajo costo para aplicaciones agrícolas

**TESIS**

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de

**MAESTRO EN INGENIERÍA**

**PRESENTA**

**Daniel Ortiz Barredo**

**Ensenada, Baja California, diciembre del 2008.**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA**

FACULTAD DE INGENIERÍA  
UNIDAD ENSENADA

**Sistema de telemetría de bajo costo para aplicaciones agrícolas**

**TESIS**

Que para obtener el grado de maestría en ingeniería presenta:

**Daniel Ortiz Barredo**

Aprobada por:

Miguel Enrique Martínez Rosas  
Director de tesis

Humberto Cervantes de Ávila  
Miembro del comité

Carlos Gómez Agis  
Miembro del comité

Ensenada Baja California, México. Diciembre 2008

**Resumen** de la tesis de **Daniel Ortiz Barredo**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN INGENIERÍA del programa de Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería (MYDCI) de la UABC. Ensenada Baja California, México, Diciembre del 2008.

## **Sistema de telemetría de bajo costo para aplicaciones agrícolas**

Resumen Aprobado por:

---

Dr. Miguel Enrique Martínez Rosas  
Director de Tesis

En este trabajo se presenta el diseño de una red de sensores inalámbrica económica, de baja velocidad y de bajo consumo de potencia con el fin de monitorizar variables medioambientales tales como temperatura y humedad relativa para aplicaciones agrícolas. Partiendo de una red estrella se logró expandir el alcance de ésta creando una red jerárquica de dos niveles, la cual se autoconfigura y asocia en vecindades de manera transparente al usuario. La comunicación utilizada fue el protocolo propietario SMAC de *Freescale*<sup>®</sup>. Se describe con detalle la metodología de diseño, se presentan figuras y diagramas de flujo con el fin de explicar las tareas que cumple el microprocesador utilizado en los nodos que conforman la red y se muestran resultados gráficos de alcance de la red en comunicación punto a punto.

**Palabras Clave:** *Redes de sensores inalámbricas, Protocolo, SMAC, Nodos, Bases, Coordinador*

# Dedicatoria

A Dios, quien es mi guía y renuevo de fuerzas en todo tiempo.

A mis padres Rogelio y Rebeca Quitero y a mi hermana Rebeca, mi familia. Por el amor que nos une y por el ejemplo que día a día me dan. Gracias por sus oraciones y por el buen consejo. Sin su incondicional apoyo y cariño durante todos estos años este trabajo no sería posible.

A la que ilumina mis días. A Dania, mi amiga, mi compañera, mi futura esposa. Gracias por tu amor y tu apoyo, por darme de tu paz en los momentos de tormenta y por caminar conmigo todo este tiempo alentándome a seguir. A ti mujer. Te amo.

A todos mis tíos y primos, unos cerca y otros lejos. Gracias por el cariño y la buena palabra brindada. Es para mi un honor que se alegren conmigo en este día.

A mi amigos cercanos. Por la alegría brindada a través de su amistad, compañía y consejo gracias.

# Agradecimientos

Quiero expresar mi agradecimiento a:

Mi director de tesis, Dr. Miguel E. Martínez Rosas. Por la amistad brindada, por su guía a lo largo de este trabajo de tesis y por el gran apoyo recibido durante estos meses, tanto como mentor como amigo.

Los miembros del comité de tesis M.C. Humberto Cervantes de Ávila y M.C. Carlos Gómez Agís, por su amistad y las observaciones aportadas con el fin de hacer de éste un mejor trabajo.

Lic. Lina Mesa, por ayudarnos a enfrentar de manera victoriosa los problemas administrativos previos a los congresos.

Los señores Paquito Ocampo y Daniel Bartolini, compañeros y amigos de licenciatura y maestría, por los buenos ratos vividos durante este tiempo y las aportaciones hechas para este trabajo.

Mis tíos Porfirio, Vange, Meche, Manolo, Elsa y a mi prima Mariana por su cercanía y apoyo constante en estos tiempos.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico brindado durante estos dos años.

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes . . . . .	1
1.2. Motivación . . . . .	3
1.3. Planteamiento del problema . . . . .	3
1.4. Objetivo general . . . . .	4
1.5. Objetivos específicos . . . . .	4
1.6. Organización de la tesis . . . . .	4
<b>2. Marco teórico y antecedentes</b>	<b>6</b>
2.1. Descripción del sistema . . . . .	7
2.2. Redes de sensores inalámbricas . . . . .	9
2.2.1. Características y topologías de las redes de sensores inalámbricas . . . . .	12
2.2.2. Nodos: características y limitaciones . . . . .	14
2.3. Capas y protocolos . . . . .	16
2.4. IEEE 802.15.4 y Zigbee . . . . .	20
<b>3. Desarrollo</b>	<b>23</b>
3.1. Módulo PAN802154 . . . . .	23
3.1.1. Microcontrolador MC9S08GB60 . . . . .	26
3.1.2. Transreceptor MC13192 . . . . .	27
3.2. Protocolo SMAC . . . . .	28
3.2.1. Trama SMAC . . . . .	29
3.3. Desarrollo del protocolo . . . . .	30
3.4. Red estrella primaria . . . . .	32
3.4.1. Diseño de la capa de aplicación . . . . .	33
3.4.2. Elementos de la red . . . . .	36
3.4.3. Tramas de la capa de aplicación . . . . .	42

3.4.4.	Comunicación sensor - nodo . . . . .	45
3.4.5.	Comunicación estación base - PC . . . . .	47
3.4.6.	Encapsulamiento . . . . .	47
3.5.	Red jerárquica . . . . .	49
3.5.1.	Coordinador general . . . . .	49
3.5.2.	Estación base . . . . .	50
3.5.3.	Nodos . . . . .	52
3.6.	Asociación de bases y asociación de nodos . . . . .	53
3.7.	Dinámica de trabajo de las vecindades . . . . .	55
<b>4.</b>	<b>Pruebas y resultados</b>	<b>61</b>
4.1.	Pruebas de potencia y alcance . . . . .	61
4.2.	Pruebas asociación de la red . . . . .	72
<b>5.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>75</b>
5.1.	Conclusiones . . . . .	75
5.2.	Aportaciones . . . . .	75
5.3.	Trabajo futuro . . . . .	76
<b>A.</b>	<b>Características de las ondas electromagnéticas</b>	<b>77</b>
A.1.	Espectro electromagnético . . . . .	80
A.2.	Banda ISM . . . . .	80
A.3.	Modulación . . . . .	81
A.4.	Modulación por desplazamiento cuaternario de fase compensada . . . . .	82
<b>B.</b>	<b>Primitivas SMAC</b>	<b>85</b>
<b>C.</b>	<b>Acrónimos</b>	<b>90</b>

# Índice de figuras

2.1.	<i>Diagrama a bloques de un sistema de comunicación bidireccional punto a punto . . . . .</i>	8
2.2.	<i>Representación gráfica de una red inalámbrica instalada en un campo agrícola . . . . .</i>	10
2.3.	<i>Distintos tipos de topologías presentes en las redes de sensores inalámbricas. a) Topología estrella. b) Topología árbol. c) Topología malla . . . . .</i>	13
2.4.	<i>Representación gráfica de los principales componentes de un nodo dentro de una red inalámbrica . . . . .</i>	15
2.5.	<i>Diagrama esquemático de protocolos, capas y servicios . . . . .</i>	17
2.6.	<i>Diagrama del modelo OSI . . . . .</i>	18
3.1.	<i>Diagrama del módulo PAN802154 donde se aprecia la posición de los headers, switch y led . . . . .</i>	25
3.2.	<i>Fotografía del módulo PAN802154 . . . . .</i>	25
3.3.	<i>Esquema a bloques comparativo de los protocolos SMAC, 802.15.4 y ZigBee™ . . . . .</i>	28
3.4.	<i>Configuración de la trama SMAC al transreceptor MC13192 . . . . .</i>	30
3.5.	<i>Red estrella con un dispositivo FFD conectado a través del puerto serie a una PC . . . . .</i>	32
3.6.	<i>Interacción entre las tres secciones del software . . . . .</i>	34
3.7.	<i>Diagrama de flujo reducido de la estación base . . . . .</i>	38
3.8.	<i>Vecindad funcional de una red estrella con elementos nombrados . . . . .</i>	39
3.9.	<i>Trama del código de identificación único en cada nodo. Los primeros tres bits indican la versión del software y los últimos tres representan el número del módulo . . . . .</i>	40
3.10.	<i>Diagrama de flujo reducido de los nodos . . . . .</i>	41
3.11.	<i>Relación intensidad-tiempo en medición de humedad en una muestra de tierra . . . . .</i>	43

3.12. Ejemplo de trama de petición de nombre de nodo nuevo . . . . .	44
3.13. Ejemplos de trama de control. Asignación de nombre de la base A a nodo nuevo . . . . .	45
3.14. Ejemplos de trama de información de sensores de nodo A02 a base A . . . . .	46
3.15. Ejemplo de trama de confirmación de la estación base A al nodo A02 . . . . .	46
3.16. Cable convertidor serie a USB Steren . . . . .	48
3.17. Contenedor o housing utilizado para resguardar los módulos . . . .	48
3.18. Flujo de comunicación entre el coordinador general, estación ba- se nodos . . . . .	50
3.19. Reasociación de los nodos de la vecindad A a la vecindad B. a) Las dos vecindades trabajando. b) La estación base A deja de funcionar. c) Los antiguos nodos de la vecindad A se asocian a la vecindad B . . . . .	54
3.20. Ejemplo gráfico de la estructura matricial dentro de las estacio- nes base para guardar los datos de cada nodo . . . . .	56
3.21. Ilustración del método de sincronización del primer nodo . . . . .	57
3.22. Ilustración del método de sincronización de un nuevo nodo cuan- do ya hay nodos sincronizados . . . . .	59
3.23. Diagrama de una red con tres vecindades . . . . .	60
4.1. Escenario principal de pruebas . . . . .	62
4.2. Prueba Tx-Rx de 500 paquetes a 20 m . . . . .	63
4.3. Prueba Tx-Rx de 500 paquetes a 40 m . . . . .	65
4.4. Prueba Tx-Rx de 500 paquetes a 60 m . . . . .	65
4.5. Prueba Tx-Rx de 500 paquetes a 80 m . . . . .	66
4.6. Posicionamiento del receptor a 79.5 m y 80.5 m del transmisor . . .	67
4.7. Prueba Tx-Rx de 500 paquetes a 79.5 m y 80.5 m . . . . .	68
4.8. Posicionamiento del receptor a 80 m con desviación de 10 m a derecha y a izquierda . . . . .	68
4.9. Prueba Tx-Rx de 500 paquetes a 80 m con desviación de 10 m a izquierda y a derecha . . . . .	69
4.10. Prueba Tx-Rx de 500 paquetes a 100 m . . . . .	70
4.11. Relación potencia / distancia de los módulos PAN802154 cada 20 m	71
4.12. Relación potencia / distancia de los módulos PAN802154 cada 20 m con 5 casos para 80 m . . . . .	71
4.13. Interfaz gráfica desarrollada en Matlab . . . . .	72

4.14. Patrón de radiación de la antena impresa en los módulos PAN802154	73
4.15. Porción de pantalla hyperterminal de una red estrella primaria A formada por una estación base y cuatro nodos . . . . .	74
A.1. Representación de una onda senoidal desplazándose en el tiempo	78
A.2. Frente de onda de un radiador isotrópico. a) Diagrama en 3 dimensiones. b) Diagrama en 2 dimensiones . . . . .	79
A.3. Modulación BPSK para una onda cuadrada. a) Entrada binaria. b) Salida BPSK. . . . .	83
A.4. Diagrama a bloques simplificado del modulador QPSK . . . . .	84

# Índice de cuadros

2.1. Principales ventajas y desventajas de los métodos de medición propuestos . . . . .	7
2.2. Tabla comparativa entre Wi-Fi, Bluetooth y Zigbee . . . . .	19
2.3. Principales características del estándar 802.15.4 . . . . .	20
3.1. Relación de canales disponibles para el transreceptor MC13192 . . . . .	27
3.2. Ejemplo de la base de datos generada por la estación base A relacionando CIU - NNU de cinco nodos . . . . .	42
A.1. Relación de canales de radiofrecuencia aprobados por la ITU . . . . .	81
A.2. Relación de salidas QPSK respecto a las posibles entradas . . . . .	84
B.1. Relación de valor-frecuencia de reloj para la primitiva <i>MLME-SetMC13192ClockRate()</i> , donde * = frecuencia recomendada y preestablecida . . . . .	86
B.2. Relación de valor-frecuencia de reloj para la primitiva <i>MLME-SetMC13192TmrPrescale()</i> , donde * = frecuencia recomendada y preestablecida . . . . .	87
B.3. Relación de código-potencia de salida de transmisión para la primitiva <i>MLMEMC13192PAOutputAdjust()</i> . . . . .	88

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Antecedentes

Una red de sensores inalámbrica consiste en un arreglo desde unos cuantos hasta millones de sensores de diversos tipos interconectados a través de una red de comunicación inalámbrica. Los datos obtenidos son utilizados como entradas en un sistema de estimación distribuido cuya función es extraer información relevante de los datos disponibles [22].

Los sensores son una extensión de los sentidos del hombre en su medio. Son dispositivos capaces de interactuar con un medio, obteniendo datos de éste con el fin de realizar algún tipo de proceso. Los avances tecnológicos han incentivado el desarrollo de dispositivos con capacidades de comunicación inalámbrica cada vez más pequeños, más potentes y con un consumo de energía más eficiente. La evolución de microsensores de bajo consumo, actuadores, procesadores embebidos y radios son los pasos tecnológicamente necesarios para permitir desarrollar redes de sensores inalámbricas en gran escala con un gran número de nodos [34]. Una de las áreas más atractivas para los investigadores es la creación de protocolos más eficientes. El desarrollo de protocolos y arquitecturas para el diseño de redes de sensores inalámbricas se ha convertido en un campo de investigación muy importante en los últimos años [3]. En esta área se han realizado grandes avances, ya que existen muchos protocolos que atacan problemas específicos, sobre todo problemas de enrutamiento y de optimización de energía [35, 27, 21, 36].

El conocimiento de los cambios de variables críticas en un sistema, sin importar el índole de éste, permite tomar decisiones de control de manera oportuna, lo que afectará directamente en la respuesta de éste. Por ejemplo, el conocimiento

de la cantidad de agua y pesticidas utilizados en un cultivo pueden representar la diferencia entre una buena cosecha o una cosecha perdida, con sus consecuentes repercusiones económicas.

Desde hace algunos años han surgido nuevas tendencias en el sector agrícola. Gracias al desarrollo en el campo de las redes de sensores inalámbricos, tales como la miniaturización de las tarjetas impresas y la optimización de la energía en los nodos, la agricultura de precisión ha comenzado a emerger [5]. Una faceta de la agricultura de precisión se concentra en el control de cosechas específicas. Esto abarca diferentes aspectos tales como la monitorización del suelo y clima en el campo. Es posible generalizar el estado del campo de cultivo completo conociendo el valor en puntos específicos de algunas de las variables que influyen de manera crítica en la calidad de la cosecha. En la actualidad ya existen algunos ejemplos de redes de sensores inalámbricas importantes, tal como el caso de Ambient Systems [13] y el de la compañía Grape Networks [23], la cual tiene instalada la red de sensores inalámbrica para agricultura más grande del mundo, cubriendo aproximadamente 50 acres con más de 200 sensores en el valle de San Ramón, California, EU [1].

Es importante notar que los usuarios de este tipo de sistemas son agricultores y trabajadores del campo, y que el principal interés de estos se encuentra enfocado a la producción. Ellos requieren datos que recomienden que decisión tomar y ahorre tiempo, no un sistema que genere trabajo adicional [15].

La producción agrícola utiliza aproximadamente el 70 % de el agua dulce a nivel mundial, y en las poblaciones en crecimiento la demanda es mayor, por lo que el nivel de agua disponible disminuye mucho más rápido de lo que es recuperado [10].

Finalmente una de las grandes ventajas que presentan las redes de sensores inalámbricas contra las redes cableadas es su adaptabilidad, ya que con ésta tecnología es posible monitorizar áreas remotas, peligrosas y de difícil acceso [24]. Otro punto muy importante es la minimización de costos. En [24] se menciona que al utilizar éste tipo de redes es posible lograr una reducción del 20-80 % respecto al costo de una red cableada. Estas dos características, sumadas al gran avance tecnológico de ésta área en los últimos años hacen posible proponer esta tecnología como una importante herramienta dentro del medio agrícola, industrial e incluso residencial. Sin embargo no todo está hecho. Aunque éste es un tema en constante desarrollo, las redes de sensores inalámbricas son aún muy primitivas y propensas a fallas. En [16] se muestran los resultados obtenidos por el proyecto LOFAR-agro [18] al desplegar una red con más de 100 nodos para una prueba piloto de tres meses en un campo agrícola, la prueba no respondió como se esperaba, pero

reveló muchos problemas de ingeniería que habían sido omitidos.

## **1.2. Motivación**

El fuerte auge que se ha presentado en los últimos años por las redes de sensores inalámbricas, junto a la gran adaptabilidad de éstas a una gran variedad de escenarios, permiten hacer de ésta una tecnología aplicable en la vida diaria. Si bien es cierto que aun se encuentra en proceso de desarrollo, ya existen en el mercado soluciones a problemas específicos utilizando éste tipo de redes.

En el presente trabajo se aborda el diseño de una red inalámbrica de sensores económica y de interacción amigable con el usuario, la cual funciona como un sistema de monitoréo básico. Se pretende implementar éste sistema en un viñedo del Norte de México, intentando de ésta manera dar solución a una problemática local con un proyecto desarrollado localmente.

Finalmente, con la implementación de este sistema en un área agrícola se busca otra meta de prioridad: la optimización de agua para el riego, ya que al ser éste un recurso limitado y compartido por todos, es imperante el racionarlo de manera óptima.

## **1.3. Planteamiento del problema**

Actualmente en la zona norte de la península de Baja California el consumo de agua en aplicaciones agrícolas es controlando de forma empírica, por lo que no es posible regular su consumo de manera apropiada. Para lograr una utilización adecuada de este vital elemento es necesario en principio conocer la cantidad mínima de agua requerida por los cultivos sin demeritar la cantidad ni la cantidad de los productos agrícolas. En la agricultura de precisión se emplean sensores que proporcionan información permanente de distintas variables, sin embargo, la localización y las dimensiones de los campos hacen inviable el uso de sistemas alambrados. Es en este punto que las redes de sensores inalámbricas proveen una solución adecuada para monitorizar el estado de los cultivos de forma remota. Actualmente existen en el mercado sistemas de redes inalámbricas diseñadas específicamente para la agricultura de precisión, pero debido a su alto precio, complejidad de manejo y escalabilidad sumamente limitada, surge la necesidad de desarrollar un sistema de telemetría de bajo costo que pueda ser utilizado por agricultores de la región, de forma que optimicen el consumo de agua y manten-

gan la calidad y cantidad de sus productos.

## **1.4. Objetivo general**

*Desarrollar un sistema de telemetría de bajo costo y sencilla interpretación para aplicaciones agrícolas.*

## **1.5. Objetivos específicos**

- *Diseñar una red inalámbrica tipo estrella*
- *Determinar el alcance de los módulos en el escenario a implementar el sistema*
- *Realizar un protocolo de asociación de nodos sensores con nodos coordinadores*
- *Realizar un protocolo de sincronización de nodos*
- *Programar una interfaz gráfica para interpretar los parámetros medidos*

## **1.6. Organización de la tesis**

El presente trabajo de tesis se encuentra dividido en cinco capítulos:

- **Capítulo 1:** donde se da una breve introducción al tema
- **Capítulo 2:** se presentan los principios teóricos con el fin de comprender lo realizado en el presente trabajo
- **Capítulo 3:** se describen los elementos, tanto de *hardware* como de *software* utilizados para el desarrollo de la tesis
- **Capítulo 4:** se muestra la metodología utilizada para llevar a cabo los experimentos junto con el análisis de estos

- Capítulo 5: tal como indica el nombre del capítulo, se presentan resultados y las conclusiones, además de presentar algunas líneas futuras de investigación

Al concluir el capítulo 5 se anexa una sección de apéndices.

- Apéndice A: se describen los conceptos fundamentales de las ondas electromagnéticas
- Apéndice B: presenta las primitivas disponibles para el manejo de SMAC

# Capítulo 2

## Marco teórico y antecedentes

No obstante de ser uno de los productores agrícolas más importantes del noroeste de México, Baja California se distingue por un factor muy importante: la escasez de agua. Este hecho hace necesario la implementación de un método con el fin de optimizar la cantidad de agua empleada en el riego. Algunos de los posibles métodos a utilizar son:

- **Empírico:** Se basa en la inspección visual y por tacto. En el caso que nos atañe, el viticultor observa el estado físico de la vid y palpa la tierra alrededor de ella, de ésta manera determina si es necesario o no hidratar la planta. Poco confiable, ya que aunque la experiencia es de gran importancia, es necesario invertir mucho tiempo en la inspección de todo el cultivo, además de que la interpretación de los hechos es meramente subjetiva.
- **Técnicas de laboratorio:** Consiste en tomar una muestra de tierra, y tratando de no alterar las condiciones originales, someter ésta a pruebas científicas en un laboratorio especializado. Este método, aún y cuando cuenta con el rigor científico, puede presentar algunos inconvenientes, tales como el error humano al momento de la obtención de la muestra o manipulación incorrecta de la muestra en el trayecto campo-laboratorio. Su elevado costo, el cual aumenta en función de la extensión del terreno hace que este método no sea accesible para todos.
- **Sensores *in-situ*:** De instalación sencilla. Confiabilidad media-alta (dependiendo de la calidad del sensor). Alternativa económica respecto a las técnicas de laboratorio. El principal inconveniente es que el operador periódica-

<b>Método</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Empírico	Económico	Poco confiable
Laboratorio	Precisión	Caro
Sensor <i>in-situ</i>	Económico	Requiere del operador
Sensor portatil	Transportable	Requiere del operador
Red de sensores	Amplia cobertura	Cantidad de sensores

Cuadro 2.1: *Principales ventajas y desventajas de los métodos de medición propuestos*

mente debe descargar la información de cada uno de los sensores, lo que reduce su factibilidad en áreas extensas.

- **Sensores portátiles:** Alternativa atrayente ya que no requieren estar instalados en la zona de estudio. El costo de este tipo de sensores varía significativamente respecto a su marca y a su precisión, Dependen, como en el caso empírico, totalmente del operador, y su aplicabilidad es muy pobre cuando el área a sensar es muy extensa.
- **Red de sensores:** Factibles en un área de muestreo grande (viñedo). Esta opción puede representar una inversión monetaria inmediata relativamente alta empleando sistemas comerciales actuales. Una de sus principales ventajas es que no requiere del operador cada vez que se realiza una medición, además de la facilidad de almacenamiento de los datos obtenidos en una computadora personal o PC.

La Tabla 2.1 muestra en resumen algunas de las ventajas e inconvenientes de estos métodos. Este capítulo trata sobre las redes de sensores y presenta una descripción de las características de los elementos con que debe contar.

## **2.1. Descripción del sistema**

La Figura 2.1 muestra a manera de diagrama a bloques las partes de un sistema de comunicación punto a punto. Éste consta básicamente de dos módulos independientes los cuales se comunican entre si a través de un medio de comunicación definido. El medio de comunicación puede dividirse en tres grupos: cableado con-

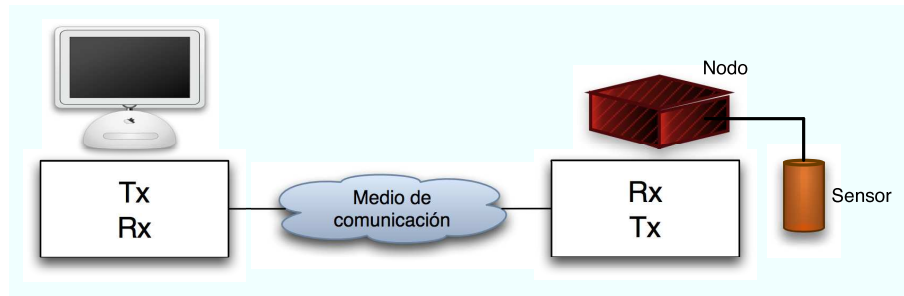


Figura 2.1: *Diagrama a bloques de un sistema de comunicación bidireccional punto a punto*

vencional (coaxial, par trenzado, etc.), enlace óptico y enlace de radiofrecuencia o RF.

- **Cableado convencional:** Entran dentro de lo denominados medios de transmisión guiados. El primer punto a considerar es la factibilidad. No es conveniente crear un enlace cableado en una red de sensores al aire libre cuando los nodos pueden estar separados varias decenas de metros unos de otros. Una de las fuertes ventajas que presenta este tipo de redes a la presente aplicación es la atenuación de la señal en el cable. Visto desde el punto de vista económico, cablear grandes extensiones de tierra puede representar un desembolso monetario fuerte, además del consecuente mantenimiento de la red y el necesario cambio de cableado cada determinado tiempo
- **Enlace óptico:** Puede ser de dos tipos: inalámbrico utilizando fotodetectores y a través de fibra óptica. Los enlaces inalámbricos son muy delicados ya que la información se distorsiona o pierde de no estar bien alineados el emisor de luz y el fotoreceptor; por lo general están diseñados para realizar comunicaciones a cortas distancias. La fibra óptica permite enviar gran cantidad de datos a tasas de velocidad más elevadas que el cable convencional y es considerada como el medio de transmisión inmune a las interferencias por excelencia, sin embargo instalar un enlace tiene un costo elevado
- **Enlace RF:** Este es un tipo de medio no guiado, ya que no existe una barrera física que delimite la transferencia de la señal de información en una dirección específica, sino que ésta se propaga libremente en un medio. Una onda electromagnética está formada por una combinación de campos eléctricos

y magnéticos oscilantes que se propagan a través del espacio transportando energía de un lugar a otro. Una onda electromagnética se produce por la aceleración de una carga eléctrica y presentan las mismas propiedades físicas inherentes al movimiento ondulatorio

La aplicación determinará cual medio de comunicación utilizar. El caso del trabajo presentado en ésta tesis es concreto: el diseño, y la consecuente instalación, de una red de sensores capaz de monitorizar variables críticas en un viñedo, con el fin de optimizar el agua utilizada para riego y mejorar la calidad del producto. Debido a que el escenario de instalación de la red es un campo agrícola, realizar un enlace utilizando cableado convencional resulta ineficiente, ya que se requerirán grandes tramos de cable cruzando el campo, lo cual tiene dos inconvenientes implícitos: la atenuación de la señal en el cable y el hecho que el cable estará expuesto a la intemperie, los animales y los trabajadores del campo, factores que fácilmente pueden dañar la integridad física de éste. Este último inconveniente da pauta a otro: el costo por mantenimiento del cableado. Realizar un enlace óptico inalámbrico es totalmente ineficaz, ya que estos son sistemas muy delicados y no están diseñados para ser instalados en el campo. Una red comunicada con fibra óptica, si bien no presenta el nivel de atenuación del cableado convencional y es inmune a las interferencias electromagnéticas, no resulta la mejor opción, ya que las fibras son muy frágiles y los empalmes entre fibras son difíciles de realizar, lo que dificulta las reparaciones en caso de ruptura en la fibra, situación muy probable en el campo. Finalmente el enlace RF podría resultar muy útil, ya que por principio se elimina el cableado físico. Es posible colocar sensores en distintos puntos y de manera inalámbrica formar una red de comunicación hacia un elemento centralizado.

La Figura 2.2 muestra el objetivo del presente trabajo: una red inalámbrica formada por nodos con sensores esparcidos por el campo comunicados con un receptor. Éste a su vez se encuentra conectado de manera alámbrica a una computadora personal o PC con el fin de mostrar gráficamente los datos enviados por los nodos.

## **2.2. Redes de sensores inalámbricas**

Las redes de sensores inalámbricos forman parte de una tecnología emergente. Hoy en día existen muchas aplicaciones potenciales para estas redes, tales como el monitoreo ambiental (temperatura, compuestos químicos específicos), monitoreo fisiológico (frecuencia cardiaca), redes industriales, vigilancia, domótica y la

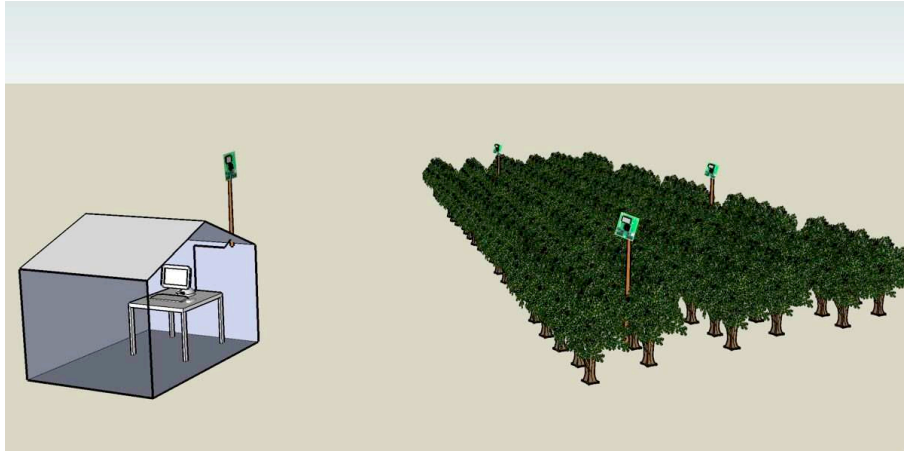


Figura 2.2: Representación gráfica de una red inalámbrica instalada en un campo agrícola

llamada agricultura de precisión, Algunas de estas aplicaciones ya están siendo ampliamente investigadas y explotadas a nivel comercial. De hecho, el rápido desarrollo, la autoorganización y la tolerancia a fallas son características que hacen a las redes de sensores prometedoras para un gran número de aplicaciones civiles como militares.

Estas redes tienen como base la tecnología *ad hoc*. En el glosario de Bluetooth [8] se define una red *ad hoc* como aquella que se crea espontáneamente. No requiere una infraestructura fija y está limitada en el espacio y en el tiempo. Las redes inalámbricas de sensores pueden ser clasificadas como un tipo de redes *ad hoc* en el sentido de que no necesitan de una infraestructura de red externa a los nodos para su comunicación y es posible mantener su estructura de red funcional a pesar del movimiento de sus elementos [6]. Cuando las primeras redes *ad hoc* surgieron, produjeron un gran auge en la investigación, ya que los protocolos de encaminamiento desarrollados para redes cableadas no se adaptan al entorno altamente dinámico de las redes *ad-hoc*. Teniendo en cuenta los grandes avances alcanzados en el área de redes inalámbricas, al parecer lo más sencillo era tomar tal cual protocolos y mecanismos ya existentes en este tipo de redes, esperando que funcionaran de igual manera en las redes de sensores inalámbricas. Sin embargo existen muchas características propias de las redes *ad hoc* no contempladas en redes inalámbricas. A continuación se indican algunas de éstas características [9]:

- El número de nodos sensores es una red puede ser de varios ordenes mayor en magnitud que una red *ad hoc*
- Posibilidad de incorporación masiva de nodos sensores
- Los nodos sensor se conforman en unidades compactas para su fácil manejo y distribución
- Es común que los nodos sensores presenten fallas
- La topología de las redes inalámbricas de sensores puede ser cambiada en cualquier momento
- Principalmente utilizan la difusión del mismo contenido a cada nodo sensor como medio de comunicación, a diferencia de las redes *ad hoc* basadas en comunicación punto a punto
- Limitaciones en cuanto a la capacidad de procesamiento, memoria y energía
- Alto grado de independencia en su funcionamiento

Desde que se inició la investigación en este tipo de redes hace poco más de una década, muchas organizaciones científicas y privadas a nivel mundial han participado en su diseño y desarrollo. Algunos de los momentos importantes de esta tecnología se citan a continuación.

- En 1994 DARPA [11] (Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada de la Defensa) funda el centro de investigación Low Power Wireless Integrated Microsensor.
- En 1998 la tecnología de redes inalámbricas es estudiada por UC-Berkeley y UCLA. Se estima que más de 100 millones de dólares financiados por el gobierno de los Estados Unidos han sido invertidos en proyectos de investigación desde entonces. El mismo año Crossbow Technologies, el mayor fabricante de nodos sensores de la actualidad y proveedor de los principales investigadores pone en el mercado el primer modelo de nodo sensor o mote
- En 2003 Berkley desarrolla el sistema operativo *TinyOS* para gestionar los recursos de los motes y permitir ejecución de aplicaciones. Más tarde el Instituto tecnológico de Massachusets (MIT) señala que las redes de sensores inalámbricas se encuentran entre las 10 tecnologías emergentes con gran impacto en el futuro.

- En 2008 se cumplen diez años de investigación académica en esta área, sin embargo aún falta un gran camino por recorrer.

Existen varias razones que explican el creciente interés tanto civil como militar en este tipo de redes. Una de las motivaciones clave para el uso de la tecnología inalámbrica hoy en día es la reducción de costos por instalación, ya que como fué antes mencionado, el mantenimiento de redes cableadas en escenarios específicos no siempre es viable económicamente. Esto, aunado al cada vez más reducido costo de los sensores y microrradios hacen de ésta una propuesta muy atractiva. Es un hecho que los sistemas inalámbricos se han impulsado gracias a las nuevas tecnologías, con un alto grado de integración y con bajo costo de los componentes requeridos [20]. Tal como fue mencionado, la adaptabilidad de estas redes es otra razón de importancia, pues al no depender de una estructura de comunicación física es posible que estas redes desempeñen tareas en sitios donde redes cableadas no podrían. Tal es el caso de la red instalada en el volcán Tungurahua en Ecuador [17] cuando éste se encontraba en proceso de erupción, o el proyecto Great Duck Island [4], donde biólogos colocaron sensores en nidos y madrigueras en una isla en la costa de Maine con el fin de estudiar aves sin interferir con ellas. Una tercer característica de importancia es la escalabilidad. Si es necesario ampliar la red, ésta puede ser modificada sin alterar su funcionamiento. Las redes pueden incrementar su extensión, y por lo tanto su poder, de manera transparente al usuario. Con encender un nuevo elemento, este debe integrarse a la red.

Sin duda una de las características más sobresalientes de esta tecnología es que se trata de una red distribuida. Cuando la localización de un fenómeno físico es desconocida, este modelo permite que los sensores estén mucho más cerca del evento de lo que estaría un único sensor. También pueden contar con procesamiento distribuido, de esta manera una red de sensores inalámbrica puede desempeñar tareas de una complejidad mayor al trabajar todos sus elementos juntos.

### **2.2.1. Características y topologías de las redes de sensores inalámbricas**

Dentro de las redes inalámbricas de sensores existen dos tipos de dispositivos. Los dispositivos de funcionamiento completo (FFD), los cuales comprenden al coordinador de la red, los repetidores y enrutadores o *routers*, y los dispositivos de funcionamiento reducido (RFD), siendo estos generalmente los nodos sensores. Como ya se ha mencionado, la redes inalámbricas de sensores son altamente adaptativas. Topológicamente existen tres tipos de configuraciones comunes, las

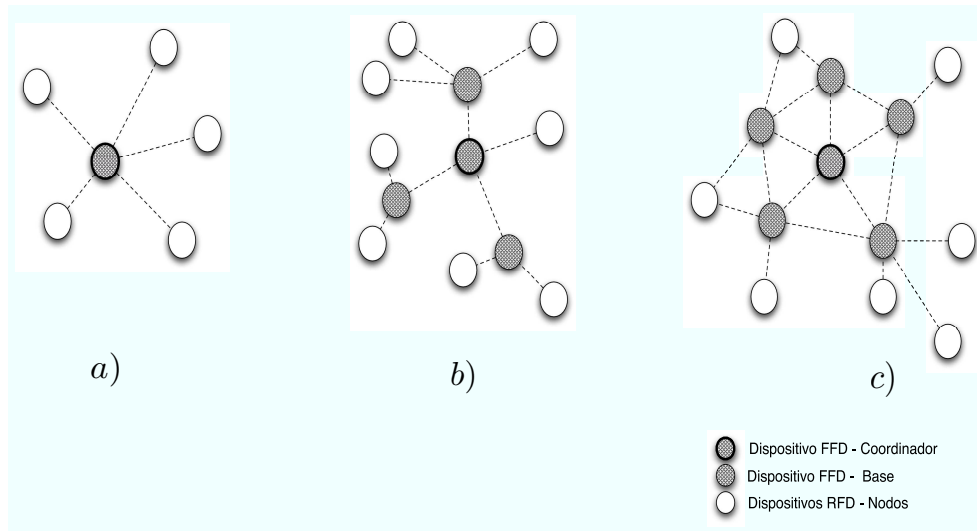


Figura 2.3: *Distintos tipos de topologías presentes en las redes de sensores inalámbricas. a) Topología estrella. b) Topología árbol. c) Topología malla*

cuales se encuentran tanto en función con el escenario donde se desea implementar como por el nivel de complejidad deseado en la red. La Figura 2.3 muestra las tres configuraciones topológicas básicas. La topología estrella se utiliza cuando el área a cubrir por la red no es muy extensa y se desea una red de baja complejidad. En ésta configuración todos los nodos (dispositivos RFD) están comunicados con un único coordinador (dispositivo FFD) de red. se permite la comunicación bidireccional únicamente entre coordinador - nodos, es decir, los nodos no se comunican entre ellos. La topología tipo árbol introduce un elemento ausente en la topología estrella: un segundo elemento FFD el cual puede conservar las funciones de los nodos RFD, además de realizar tareas de enrutamiento de datos. Este tipo de topología puede verse como una topología estrella extendida. La topología tipo malla puede verse como una fusión de las primeras dos topologías. Al igual que las anteriormente mencionadas, cuenta con un coordinador general de red, y comparte con la topología tipo árbol el uso de enrutadores. La ventaja principal de ésta topología es la posibilidad de generar múltiples trayectorias desde un nodo hasta el coordinador. Ésta es una gran ventaja con la que no cuenta la topología estrella. Hay que recordar que el ambiente de las redes de sensores inalámbricas es altamente dinámico y propenso a fallas. En la topología tipo árbol, si un enrutador deja de funcionar, la información de los nodos conectados a este se pierden.

Gracias a protocolos implementados en la capa de acceso al medio o MAC, la topología malla puede generar una ruta alterna, de tal manera que la información de los nodos llegue a otro enrutador, evitando de esta manera la pérdida de los nodos inicialmente conectados con el enrutador caído.

### **2.2.2. Nodos: características y limitaciones**

Debido a los requerimientos de las redes de sensores inalámbricas, los nodos están diseñados para funcionar con capacidades mínimas, por lo cual el desempeño que pueden generar individualmente es muy limitado. En una aplicación real un nodo por sí solo no representa una solución, ya que debido a las marcadas limitaciones que presenta en su diseño, el nodo debe de cumplir con un número de tareas dependiendo de las necesidades de la red teniendo capacidad de procesar una limitada cantidad de datos. El verdadero potencial de esta tecnología descansa en la posibilidad de construir una solución cooperativa en la que un nodo pueda fungir como puesto de relevo, por la que se recibe y reexpide la información de otro nodo, acercándola hacia un centro de recolección [19]. Otra característica importante en las redes inalámbricas de sensores es que al funcionar en red, el nodo es un elemento importante pero prescindible. Si en un determinado tiempo un nodo deja de funcionar, el resto de los nodos que forman la red deben, de ser necesario, readaptarse y continuar trabajando, de modo que no debe de ser impedimento para que la red siga desempeñando sus tareas. La figura 2.4 muestra los principales elementos que forman un nodo inalámbrico. Generalmente este tipo de nodos está compuesto por los siguientes elementos:

- Microcontrolador, es el encargado de ejecutar el programa del nodo, procesar la información y controlar los demás dispositivos que componen al nodo
- Memoria de almacenamiento, donde se almacenan los datos recabados por los sensores
- Sensores, los cuales están en contacto con el medio, obteniendo datos del mundo real
- Unidad de comunicación inalámbrica, generalmente conocida como transceptor.
- Fuente de energía, de donde el nodo obtendrá la energía necesaria para desempeñar sus tareas

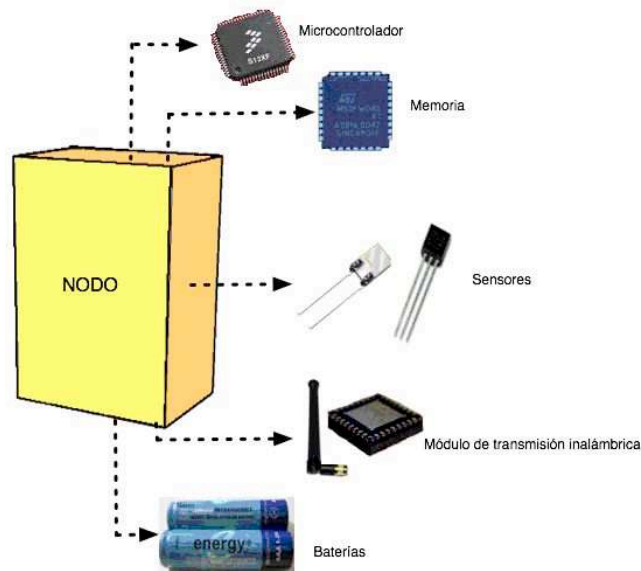


Figura 2.4: Representación gráfica de los principales componentes de un nodo dentro de una red inalámbrica

Independientemente de los componentes internos de un nodo, se debe tomar en cuenta que por lo general este tipo de redes es utilizada en escenarios poco amigables, por lo que es fundamental el crear un dispositivo resistente a la intemperie mediante un sistema de encapsulado de alta confiabilidad.

Las principales limitaciones de los nodos son:

- Capacidad de almacenamiento: no siempre es posible adaptar una memoria al nodo, y por lo general los microcontroladores solo disponen de unos cuantos KB. Esto, sin embargo, es parcialmente solucionable si la red tiene como concentrador de la información una PC
- Alcance de enlace: este tipo de tecnología está basada en nodos equipados con radios de corto y mediano alcance debido a que están diseñados para formar redes personales inalámbricas de baja velocidad (LR-WPAN). Este inconveniente puede solucionarse aumentando la densidad de nodos en el área, o instalando un módulo transmisor de mayor potencia
- Tiempo de vida: factor en extremo limitante, ya que al encontrarse los nodos muchas veces en lugares remotos, el usuario no siempre puede realizar

un cambio de baterías. Estas redes están diseñadas para optimizar el consumo de energía, sin embargo, por lo antes mencionado, es necesario que el programador utilice algoritmos de bajo consumo

## 2.3. Capas y protocolos

Es importante definir tres conceptos afines a la programación en redes *ad hoc* y de sensores a nivel *software*: capa, protocolo y servicio. Las capas son cada uno de los niveles en la programación estructurada. El propósito de cada capa es ofrecer ciertos servicios a las capas superiores a las cuales no se les muestra los detalles reales de implementación de los servicios ofrecidos [32]. El siguiente concepto es el de protocolo. Se le llama así al conjunto de reglas que rigen el formato y significado de los paquetes o mensajes que intercambian entidades iguales en una capa [32]. En otras palabras, es el acuerdo entre las partes en comunicación sobre como se debe llevar a cabo la comunicación. Por último, se le llama servicios al conjunto de operaciones que una capa  $n$  proporciona a la capa  $n + 1$ . La Figura 2.5 ejemplifica estos tres conceptos.

En los años 80 se comenzó a desarrollar a gran velocidad nuevas tecnologías referentes a la comunicación en red entre computadoras [32]. El veloz auge de ésta tecnología y la falta de regularización provocó que cada compañía desarrollara sus propios protocolos, haciendo de ésta manera incompatible la comunicación entre equipos de distintas compañías. El modelo OSI nace en 1982 creado por la Organización Internacional de Estandarización ISO, proponiendo una programación estructurada en capas de servicios. La finalidad del modelo OSI fue lograr la regularización y estandarización internacional de los protocolos utilizados entre las distintas capas. Este modelo se ocupa de la Interconexión de sistemas abiertos a la comunicación, esto es, sistemas con capacidades de comunicarse con otros sistemas. La programación en capas permite reducir la complejidad del diseño, organizando el trabajo y realizando las funciones necesarias de manera organizada y secuencial. Cada una de estas capas cumple con ciertas tareas específicas. Éste modelo está creado de tal manera que las capas inferiores brinden información y servicios a las capas superiores.

El modelo OSI cuenta con siete capas definidas, tal como se muestra en la Figura 2.6. Cada una de ellas realizan funciones específicas. Estas capas son:

**Capa física:** Su función principal es transmitir una serie de bits a través de un medio. Existen dos tipos de medios: el medio guiado, tal como el cable

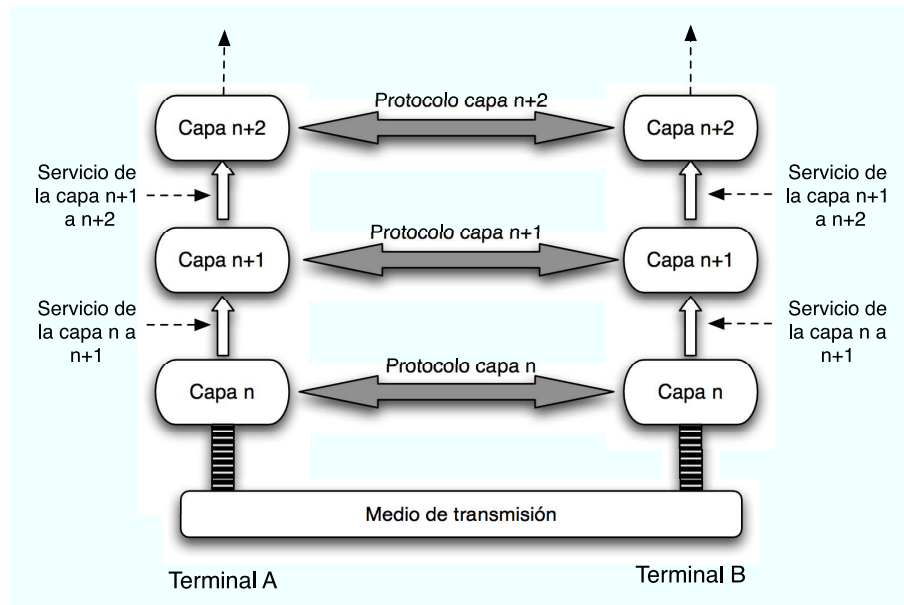


Figura 2.5: Diagrama esquemático de protocolos, capas y servicios

coaxial o la fibra óptica, y los medios no guiados, como radiofrecuencias, microondas o láseres entre otros.

**Capa de enlace de datos:** Esta se divide en dos subcapas: MAC y LLC. Su tarea es transformar un medio de comunicación puro en una línea de transmisión libre de errores al arribar a la capa superior. Esto es logrado segmentando la información en tramas de datos mediante diversas técnicas y enviando éstas tramas de manera secuencial al receptor. En ésta capa se encuentran los protocolos de acceso al canal de comunicación.

**Capa de red:** Lleva el control de la congestión de red. Es la responsable de lograr que los datos lleguen desde el origen hasta el destino sin importar si están conectados directamente o no.

**Capa de transporte:** Esta capa separa las tres capas anteriores, dedicadas a la comunicación, de las siguientes tres capas superiores, orientadas al procesamiento.

**Capa de sesión:** Permite establecer sesiones entre varias terminales de la red.

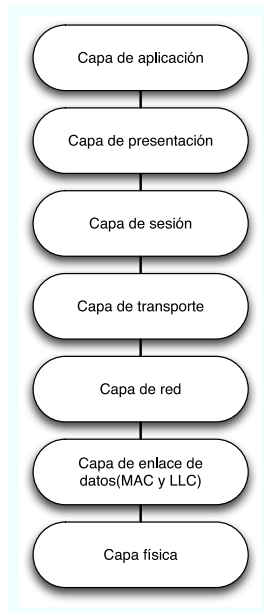


Figura 2.6: *Diagrama del modelo OSI*

Las sesiones ofrecen varios servicios, tales como el control de diálogo y sincronización.

**Capa de presentación:** A ésta capa le corresponde la sintaxis y semántica de la información transmitida.

**Capa de aplicación:** Las capas debajo de ésta sirven para proporcionar transporte confiable a la información. En la capa de aplicación se hace uso de la información transportada por las demás capas, sin embargo ésta capa también necesita de protocolos de apoyo que permitan el funcionamiento de las aplicaciones reales. Es aquí donde se programa la interfaz con el usuario.

Uno de los temas más explotados, y sin embargo con una gran cantidad de trabajo por realizar aún, es el desarrollo de protocolos eficientes para este tipo de redes. A la fecha existe una gran cantidad de protocolos de comunicación diseñados para aplicaciones en redes inalámbricas. En mayo del 2003 se aprobó la primera revisión del estándar IEEE 802.15.4 para redes LR-WPAN, con el propósito de definir los niveles de red básicos para dar servicio a este tipo de redes, las cuales se basan en la habilitación de comunicación entre dispositivos con bajo costo y

<b>Estándar</b>	<b>Wi-Fi 802.11g</b>	<b>Wi-Fi802.11</b>	<b>Bluetooth</b>	<b>ZigBee</b>
<b>Aplicación</b>	WLAN	WLAN	WPAN	Control y monitoreo
<b>Memoria necesaria</b>	1MB+	1MB+	250 kB+	4-32 kB
<b>Vida baterías [días]</b>	0.5-5	0.5-5	1-7	100-300+
<b>Tamaño red [nodos]</b>	32	32	1	255
<b>Velocidad</b>	54 Mbps	11 Mbps	720 kbps	20-250 kbps
<b>Covertura [m]</b>	100	100	10 (v1.1)	1-100
<b>Parámetros importantes</b>	Velocidad y flexibilidad	Velocidad y flexibilidad	Costo económico y aplicación	Fiabilidad, bajo consumo y coste

Cuadro 2.2: *Tabla comparativa entre Wi-Fi, Bluetooth y Zigbee*

de baja velocidad (es decir, aplicaciones en donde la transferencia de información no es muy alta). Se enfatiza el bajo consumo de potencia para comunicar nodos cercanos y con poca infraestructura. Una de las especificaciones con más éxito dentro de estas redes, ZigBee™, tiene como base este estándar.

Los requisitos de cualquier aplicación de redes de sensores inalámbricos siempre dependerán estrechamente de la aplicación concreta, por lo que la elección de los protocolos a utilizar no debe de ser tomada a la ligera. Al realizar el diseño hay que tomar en cuenta tres parámetros de importancia, donde el primero de ellos es el bajo consumo de potencia. Al ser alimentados por baterías, tanto los nodos como el protocolo de comunicación requieren ser diseñados con características específicas, buscando el máximo ahorro de energía posible. El segundo parámetro es la latencia, la cual representa la suma de retardos producidos por la demora en la recepción y transmisión de datos dentro de una red. La latencia presente en la comunicación de variables medioambientales no es un factor crítico, ya que la monitorización de éstas no presenta cambios abruptos ni limitaciones críticas. El tercer parámetro es la confiabilidad. El usuario final espera que los datos obtenidos a través de la red sean correctos, de tal forma que las decisiones que se tomen a partir de ellos sean afines a la mejora del producto.

En los últimos años han surgido diversos protocolos y especificaciones para comunicaciones inalámbricas, cada uno de ellos enfocado a aplicaciones específicas. Los tres estándares más fuertes son wi-fi, bluetooth y ZigBee™. La Tabla 2.2 muestra las características básicas de cada uno de estos.

<b>Propiedad</b>	<b>Rango</b>
Frecuencia	Dos capas físicas: 868 MHz/915 MHz y 2.4 GHz
Tasa de transmisión	868 MHz/915 MHz a 40 kpps y 2.4 GHz a 250b kbps
Rango	10 a 20 m
Canales disponibles	868 MHz: 1, 915 MHz: 10 y 2.4 GHz: 16
Acceso al canal	Acceso múltiple por detección de portadora con anulación de colisiones (CSMA/CA)
Temperatura de operación	-40 a 85 C

Cuadro 2.3: *Principales características del estándar 802.15.4*

## 2.4. IEEE 802.15.4 y Zigbee

IEEE 802.15.4 es un estándar que especifica el control de la capa física y la capa de acceso al medio para redes tipo LR-WPAN's con dispositivos portátiles y con consumos de energía muy limitados que típicamente operan en un espacio de 10 m. Dependiendo de la aplicación, un mayor alcance a una menor tasa de transmisión es aceptable. La característica fundamental de 802.15.4 entre las WPAN's es la obtención de muy bajos costos de fabricación por medio de la sencillez tecnológica, sin perjuicio de la generalidad o la adaptabilidad. La primera revisión del estándar fue en 2003. En 2006 fue publicada la segunda edición y en 2007 la tercera, corrigiendo y agregando capacidades al estándar.

El estándar está concebido para que los dispositivos interactúen entre en una red inalámbrica sencilla. La arquitectura del estándar está basada en el modelo OSI, aunque tan solo las dos capas más bajas, la capa física y la capa MAC, están definidas. La Tabla 2.3 muestra las principales características de este estándar. IEEE 802.15.4 ofrece 2 capas físicas, de las cuales la más utilizada es la de 2.4 GHz debido a su disponibilidad libre a nivel internacional, sin embargo es la que potencialmente puede tener mayores problemas de interferencia debido a los múltiples dispositivos (microondas, teléfonos, dispositivos Bluetooth por mencionar algunos) que trabajan en la misma banda. Cuenta con un total de 27 canales esparcidos entre las dos capas físicas, 16 de ellos para 2.4 GHz, numerados del 11 al 26. Las principales funciones que cumple esta capa son:

- Activación y desactivación del transreceptor radio
- Detección de energía (ED) del canal

- Indicar la calidad de enlace de los paquetes recibidos
- Realizar la evaluación de limpieza de canal (CCA) para el mecanismo de acceso al canal
- Selección de los canales frecuenciales
- Transmisión y recepción de datos

Como frecuencia de trabajo el estándar marca una sensibilidad receptiva de -85 dBm o mejor para una transmisión con una tasa de error menor al 1 %. El rango de distancia de trabajo deseado está en función de la sensibilidad del receptor así como de la potencia del transmisor. El estándar especifica la transmisión mínima de 1 mW de potencia en los dispositivos, sin embargo ésta puede ser modificada dentro de un rango específico dependiendo de la aplicación deseada. Dentro de una red formada con este estándar existen dispositivos FFD y RFD, donde cada dispositivo cuenta con un identificador único de 64 bits. También pueden utilizarse identificadores de 16 bits como identificadores reducidos en una red de área personal.

La capa MAC maneja el acceso al canal de radio físico. En este estándar se manejan estructuras conocidas como supertramas las cuales son definidas por el coordinador. Estas supertramas están delimitadas por *beacons*. Los *beacons* son una cabecera opcional de la supertrama. En ellos se añade información relevante a la gestión de comunicación y son utilizados para sincronizar los dispositivos adjuntos e identificar la red de área personal. Dentro de la capa MAC, algunas de las principales tareas que se realizan son:

- Generar los *beacons* de la red si el dispositivo es un coordinador
- Sincronización de los *beacons*
- Soporte a las asociaciones y desociaciones en las redes PAN
- Soporte de seguridad al dispositivo
- El empleo de acceso múltiple por detección de portadora con anulación de colisiones (CSMA-CA) como acceso al canal

Una de las contribuciones de mayor importancia de este estándar es que se trata de una tecnología que puede permitir el cambio de la computación interactiva (centralizada en el humano) a la computación proactiva (sistemas embebidos

supervisado por el humano) [26].

El resto de las capas y subcapas de más alto nivel no están definidas en el estándar, sin embargo existen especificaciones construidas sobre IEEE 802.15.4 con el fin de ofrecer soluciones interales. Tal es el caso de ZigBee™.

ZigBee™ es el nombre de la especificación para protocolos de comunicación de alto nivel que utiliza radios digitales de bajo consumo y de pequeñas dimensiones. Esta basado en el estándar IEEE802.15.4-2006 para redes inalámbricas de área personal (WPAN). Esta tecnología intenta ser de baja complejidad y más económica que otros protocolos de redes tal como Bluetooth. La alianza ZigBee™ está formada por un grupo de más de 100 compañías que mantienen y publican el estándar. La especificación 1.0 fue publicada el 14 de diciembre de 2004, y el 30 de octubre de 2007 si hizo publica la última vesión hasta ahora. La idea, y el nombre, de esta especificación proviene de la observación de los patrones que siguen las abejas de flor en flor cuando recolectan polen. Mientras otros estándares importantes, como los mencionados en la tabla 2.2 están orientados a la transmisión de grandes cantidades de información o a la interconexión entre dispositivos electrónicos y periféricos, ZigBee™ está orientado a proveer una conectividad altamente eficiente entre dispositivos que envíen pequeños paquetes a baja velocidad de transmisión de datos y con un consumo de potencia mínimo. El precio de un dispositivo ZigBee™ es muy competitivo. En el mercado se encuentran disponibles nodos para esta especificación a una fracción del costo de un nodo Bluetooth.

ZigBee™ no es considerada una tecnología, sino un conjunto estandarizado de soluciones que pueden ser implementadas por quien lo requiera.

# Capítulo 3

## Desarrollo

Hoy en día en el mercado existen varias compañías, tales como *Freescale*<sup>®</sup>, *Crossbow*<sup>®</sup> y *MoteIT*<sup>®</sup> dedicadas al diseño y desarrollo de productos que ofrecen soluciones en el área de sensado inalámbrico. En base a la oferta de dichos productos y después tanto de evaluar las necesidades de la presente aplicación como de realizar un estudio de índole técnico y económico, se decidió utilizar el producto PAN80154 de *Panasonic*<sup>®</sup>. En este capítulo se presenta una descripción del mismo. Posteriormente se explica la elección del protocolo a utilizar y finalmente se presenta el diseño y funcionamiento de la red formada.

### 3.1. Módulo PAN802154

La Figura 3.2 muestra un par de módulos PAN802154. Estos son módulos radio para comunicación de baja tasa y bajo consumo adaptados de la plataforma SARD (Sensor Applications Reference Desing) de *Freescale*<sup>®</sup>. Cuentan con un microcontrolador MC9S08GB60, también de *Freescale*<sup>®</sup>, un transreceptor MC13192, una antena impresa, un *switch* tipo *push button* de proposito general conectado al canal PTA2 y un led conectado al canal PTD0 del microcontrolador. Las características básicas de estos módulos son:

- Soporte completo a aplicaciones ZigBee<sup>™</sup>, 802.15.4 y Simple MAC
- Opera en la banda ISM a 2.4 GHz
- Acceso a 16 canales con espacio de 5 MHz entre ellos
- Velocidad de transmisión de 250 Kbps

- Potencia de salida típica de 0 dBm
- Sensibilidad de recepción típica de -92 dBm a 1 % de tasa de error
- Protección en la sección de RF para aumento de desempeño
- 3-3.4 VDC utilizando RS-232 (2.2-3.4 VDC sin utilizar RS-232)
- Corriente DC en Rx/Tx típica a 35 mA ( $5\mu\text{A}$  en estado ocioso)

El transreceptor está localizado bajo un escudo protector de radiofrecuencias (RF). Este, junto con el microcontrolador forman un radio estándar IEEE 802.15.4 completamente manejable. Cada módulo cuenta con cuatro conectores de patillas de control llamados *headers* comunicados con el microcontrolador. En la Figura3.1 se muestra la posición de los *header* en cada módulo [25]. Cada uno de estos cumplen con funciones diferentes

- *Header J1*: Conexión con el programador
- *Header J2*: Conexión para la comunicación serie con una computadora (PC)
- *Header J3*: De propósito general. Cuenta con diez patillas, las cuales permiten comunicarse con 6 bits puerto digital A del microcontrolador, dos entradas analógicas para el convertidor analógico-digital (ADC) y dos patillas para referencia de voltaje
- *Header J4*: Para energizar el módulo (conexión para baterías)

Al tener que comunicarse con los periféricos del microcontrolador únicamente a través de uno de los *headers*, específicamente del J3, el acceso a éstos es muy limitado, sin embargo hay que recordar que estos módulos están diseñados para funcionar como nodos en redes inalámbricas de sensores, por lo cual solo se tiene acceso a las características del microcontrolador que puedan ser útiles para éste tipo de aplicaciones.

Para comunicarse inalámbricamente, estos módulos funcionan con *software* provisto por *Freescale*<sup>®</sup> como Simple MAC, 802.15.4 MAC y la especificación ZigBee<sup>™</sup>. Dependiendo de las necesidades de la aplicación el desarrollador puede escoger una de las plataformas anteriores. Simple MAC es la más sencilla, seguida de 802.15.4 MAC. Utilizar la pila de ZigBee<sup>™</sup> sobre 802.15.4 MAC es la solución más completa y permite que el producto terminado alcance el estándar de

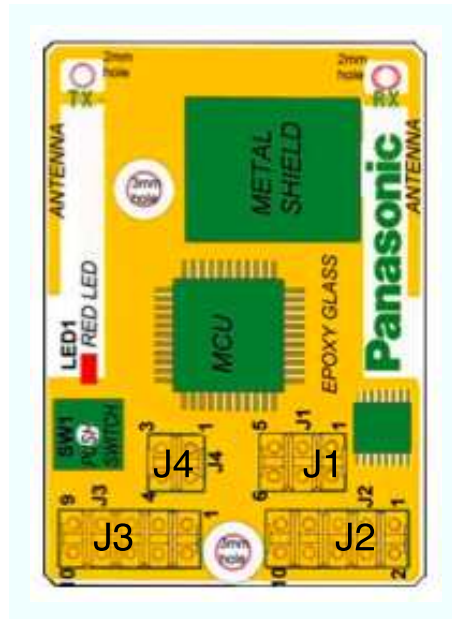


Figura 3.1: Diagrama del módulo PAN802154 donde se aprecia la posición de los headers, switch y led

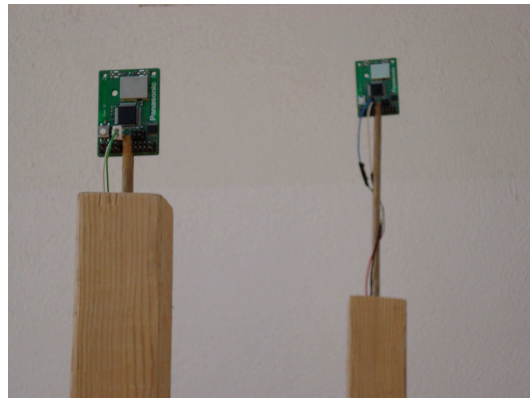


Figura 3.2: Fotografía del módulo PAN802154

la Alianza ZigBee™ [25]. Estos módulos pueden fungir dentro de la red tanto como dispositivos FFD como RFD, dependiendo de la topología y la programación a cada uno de éstos. La plataforma de desarrollo que utilizan es el compilador *Metrowerks CodeWarrior Development Studio for HC(S)08*. Para su programación se utiliza el lenguaje ANSI C. también es posible utilizar bloques de código ensamblador para secciones del *software* en donde la velocidad es crítica [25]. A continuación se da una descripción de dos de los elementos principales en los módulos PAN802154: el microcontrolador y el transreceptor.

### **3.1.1. Microcontrolador MC9S08GB60**

El MC9S08GB60 es parte de la familia HCS08 de *Freescale*®. Es un microcontrolador de bajo costo y alto rendimiento de 8 bits. Una de las fuertes ventajas de este microcontrolador es que tal como anteriormente fue mencionado, es compatible con el compilador *Metrowerks CodeWarrior*. Algunas de las características y periféricos con los que cuenta son:

- Hasta 40 MHz
- 60 K de Flash
- 4K de RAM
- 56 canales de digitales I/O
- 2 entradas analógicas
- ADC de 10 bits
- 32 fuentes de Interrupción/reset
- Modo de reserva de energía
- 2 módulos de comunicación serial
- Detección de bajo voltaje
- Comunicación serie síncrona

En el caso de los microcontroladores montados en módulos PAN802154 solo es posible acceder a algunos de sus periféricos a través de los *headers* J2 y J3 mientras que el resto permanece inaccesible. Esto limita muchas de las funciones posibles del microcontrolador, sin embargo las periféricos accesibles son sobrados para realizar una aplicación de redes de sensores inalámbricas como la presente.

### 3.1.2. Transreceptor MC13192

El MC13192 es un transreceptor de corto alcance y bajo consumo de potencia. Opera en la banda ISM en el rango de los 2.4 GHz diseñado para ser utilizar el estándar IEEE 802.15.4. Entre algunas de sus áreas de aplicación se encuentran el control remoto de sistemas industriales, redes de sensores inalámbricas, domótica, control de entretenimiento remoto y juguetes inalámbricos.

Canal	Frecuencia	Canal	Frecuencia
0	2.405 GHz	8	2.445 GHz
1	2.410 GHz	9	2.450 GHz
2	2.415 GHz	10	2.455 GHz
3	2.420 GHz	11	2.460 GHz
4	2.425 GHz	12	2.465 GHz
5	2.430 GHz	13	2.470 GHz
6	2.435 GHz	14	2.475 GHz
7	2.440 GHz	15	2.480 GHz

Cuadro 3.1: *Relación de canales disponibles para el transreceptor MC13192*

Este transreceptor está caracterizado tanto en laboratorio como en pruebas de campo para determinar su habilidad de coexistencia con otros dispositivos trabajando en la banda ISM. La potencia de transmisión del MC13192 es normalmente de 0 dBm, pero esta potencia de salida es programable hasta 4 dBm. Las pérdidas de trayectoria en el espacio libre están definidas por:

$$\text{Path loss} = 10N \log_{10}(f) + 10N \log_{10}(d) + 32.44 \text{dB}$$

N=coeficiente de perdidas de trayectoria

f=frecuencia en MHz

d=distancia en Km

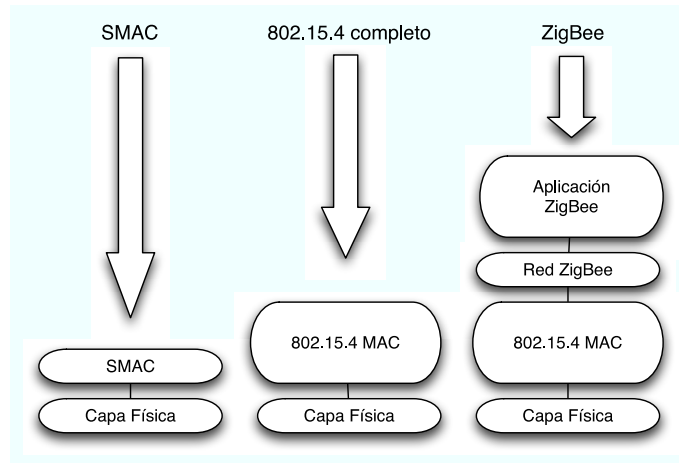


Figura 3.3: Esquema a bloques comparativo de los protocolos SMAC, 802.15.4 y ZigBee™

Con la ecuación anterior, bajo condiciones ideales, las pérdidas de trayectoria son calculadas con  $N = 2$ . Cuando el canal de transmisión no es ideal, el coeficiente de pérdida de trayectoria típico es de 2.05 a 2.5 para línea de vista y 3.0 y 4.0 para ambientes cerrados o cuando no existe línea de vista. Tal como fue comentado en el capítulo 2, las características no ideales del canal de transmisión permite que se presenten efectos de reflexión, difracción y/o dispersión.

### 3.2. Protocolo SMAC

Sabiendo que la elección del protocolo a utilizar siempre estará en función de la aplicación deseada, es muy importante definir cuales son los alcances de ésta con el fin de tomar una buena decisión. Como ya fue mencionado, los módulos PAN802154 soportan tres niveles de operación o protocolos: ZigBee™, 802.15.4 y Simple MAC, todos basados en el modelo OSI. La Figura 3.3 ilustra de manera gráfica las similitudes y diferencias entre ellos.

Como se observa en la Figura 3.3, SMAC está compuesto por la capa física, común en los tres protocolos, y una capa MAC sencilla, la cual, a diferencia de la 802.15.4 MAC, no cuenta con una subcapa LLC. Este es un protocolo sencillo basado en el estándar IEEE 802.15.4, implementado para trabajar con los transreceptores manejados por microcontroladores de la misma compañía. Esta es la

solución de menor costo ya que utiliza pocos recursos del microprocesador y su funcionalidad es muy limitada. Entra dentro de lo que se conoce como protocolos propietarios, esto es, protocolos desarrollados por un usuario específico con el fin de atacar un problema específico. Soporta redes con topología estrella y punto a punto, pero se pueden realizar una topología más compleja creando una capa de red propia o adicionando nodos repetidores. SMAC no implementa de manera completa ni la pila de ZigBee™ ni la capa completa 802.15.4, sin embargo, es ideal para aplicaciones sencillas y de bajo costo. La capa física trabaja a 2,450 MHz empleando técnica de espectro extendido por secuencia directa y modulación O-QPSK, soportando una tasa de datos en el aire de 250 kb/s. El código está escrito totalmente en ANSI C y está distribuido en el software BeeKit, el cual requiere de 4 a 8 Kb de memoria Flash. SMAC puede ser una solución óptima cuando se requiere una topología estrella simple con código compacto, y sobre todo si no se requiere las ventajas e interoperabilidad, y por ende, la complejidad que ofrece ZigBee™.

### 3.2.1. Trama SMAC

La estructura de la trama esta diseñada para mantener la complejidad al mínimo mientras que al mismo tiempo sea lo suficientemente robusta para su transmisión en un canal ruidoso. La Figura 3.4 muestra la estructura del paquete que transmiten y reciben los transreceptor MC13192.

La trama está dividida en cinco partes principales, las cuales son:

**Preámbulo:** Formado por los cuatro primeros bytes. Es utilizado por el transreceptor para obtener el chip y el símbolo de sincronización de un mensaje entrante. Cuando éste campo es detectado por el receptor, se inicia una medición de energía recibida durante un periodo de 64  $\mu$ S, la cual es llamada LQI (Link Quality Indicator).

**Delimitador de inicio de trama:** El byte SFD (Start of Frame Delimeter) indica el fin de la cabecera de sincronización y el inicio de la trama de datos. Su longitud es de un byte.

**Indicador de longitud de trama:** En el byte FLI (Frame Length Indicator) es un campo de 7 bits de longitud que especifica en número total de bytes contenidos en Payload Data. Este valor debe estar entre 0 y 127.

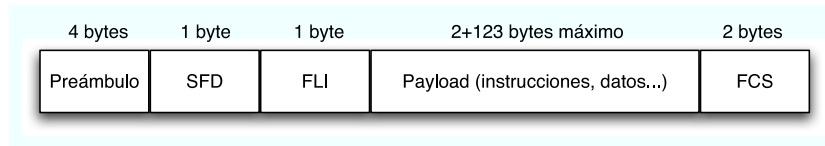


Figura 3.4: Configuración de la trama SMAC al transreceptor MC13192

**Payload Data:** Bloque con una longitud total de 125 bytes, donde los dos primeros son otorgados por la subcapa MAC y configuran a la trama en modo no promiscuo. En los 123 bytes restantes se colocan los datos, comandos o cualquier información que el programador considere necesaria

**Secuencia de comprobación de cuadro:** Los últimos dos bytes son de FCS (Frame Check Sequence). En estos se introduce un código de 16 bits generados por un algoritmo CRC (Cyclical Redundancy Check) definido en [31]. Al recibir un paquete, el receptor calcula el FCS del paquete recibido y compara el resultado con los últimos dos bytes de este. Si los resultados son iguales significa que el paquete se transmitió sin errores.

### 3.3. Desarrollo del protocolo

Una vez conocidas las características básicas en potencia de los módulos y de estimar un rango seguro de acción, se procedió a analizar que tipo de protocolo dentro del estándar sería utilizado. Como ya fue mencionado, los módulos PAN802154 cuentan con un microcontrolador MC9S09GB60 de *Freescale*<sup>®</sup>. Esta familia de microcontroladores y familias posteriores tiene la capacidad de soportar las tres pilas para comunicación inalámbrica de *Freescale*<sup>®</sup> dentro del estándar IEEE 802.15.4. Después de realizar evaluaciones económicas y técnicas, se optó por utilizar SMAC. Algunas de las razones por las cuales se llegó a esta decisión son:

- Muy bajo requerimiento de memoria en el microcontrolador
- No se requiere pagar licencia
- Presenta las herramientas necesarias para solucionar el problema propuesto

- Repercusión económica: el utilizar herramientas básicas y sin costo se verá reflejado en el precio del producto final

Como ya fue mencionado en el Capítulo 1, uno de los objetivos del presente trabajo es el diseño y la consecuente construcción de una red inalámbrica tipo estrella tal como la mostrada en la Figura 3.5. Las características básicas con las cuales debe de cumplir esta red son:

- Adaptabilidad: La red debe adaptarse a diferentes tipos de escenarios
- Autoconfiguración: Los procesos de configuración, transmisión y recepción de datos deben ser transparentes al usuario. Éste solo debe posicionar los nodos donde sea necesario y prenderlos para conocer los datos sensados a través de una interfaz gráfica
- Confiable: A partir de los datos obtenidos por esta red, el usuario tomará decisiones que afectarán directamente al producto, por lo que es de suma importancia que la red se mantenga funcional y que los datos brindados sean correctos
- Escalabilidad: Si bien es necesario al menos un transmisor de datos y un receptor de estos, es importante que la red no se encuentre limitada a un número único de módulos, sino que pueda crecer en tamaño, y por ende en potencia, de manera fácil y sencilla

Al ser una red diseñada para una aplicación concreta, se conocen ciertos factores los cuales son de importancia a considerar durante el diseño:

- Baja velocidad de transmisión de datos
- Frecuencia de envío de paquetes muy baja debido a que los cambios climáticos no son abruptos
- Bajo consumo de potencia
- El factor de latencia no es crítico
- Un solo nodo puede cubrir varios metros cuadrados de superficie

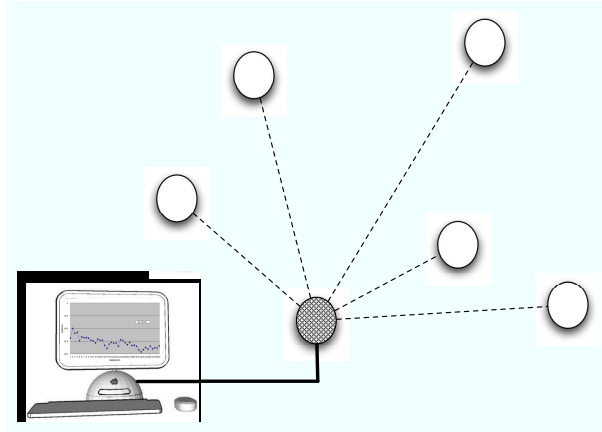


Figura 3.5: Red estrella con un dispositivo FFD conectado a través del puerto serie a una PC

### 3.4. Red estrella primaria

Partiendo de la topología tipo estrella, se ideó el diseño de una red formada por dos tipos de elementos: los nodos, los cuales fungirán como dispositivos RFD, y una estación base, la cual será un dispositivo FFD. Los nodos son los elementos de la red que se encuentran en contacto con el medio a estudiar. Para el caso de la presente aplicación se encontrarán en un viñedo. Para cumplir con el propósito de su diseño, los nodos están equipados con sensores de temperatura y humedad. Para pruebas en laboratorio se utilizó el sensor Sensirion TH11, el cual en un mismo encapsulado integra ambos sensores. El TH11 cuenta con su propio convertidor analógico/digital, entregando una señal de 12 bits para la temperatura y 8 bits para la humedad. Si bien los nodos son los encargados de sensar el medio, el diseño de éstos va más allá de la electrónica o la programación de un protocolo de comunicación. Ya que se encontrarán al aire libre, es de suma importancia diseñar un buen sistema de encapsulamiento, de tal manera que la electrónica no se vea afectada por condiciones externas tales como lluvia o sol. Otro punto de importancia es el consumo de potencia. Ya que los nodos estarán colocados en un campo agrícola, presumiblemente alejados de una fuente de energía tal como generadores o cableado eléctrico, su energía provendrá de baterías tipo AA, por lo cual es muy importante mantener un bajo consumo en todo tiempo dadas las limitaciones de su fuente de poder. Los nodos deben sensar cada determinado

tiempo su zona y los datos tomados, junto con algunos bytes de información para la red, son enviados a la estación base.

### 3.4.1. Diseño de la capa de aplicación

Si bien el *software* de la estación base difiere al de los nodos en muchas partes, en otras es prácticamente igual y guardan la misma estructura de programación. En ambos casos la capa física y la capa simple MAC del estándar es la misma. Es en la capa de aplicación, la cual determinará las funciones de cada elemento, donde se presentan cambios significativos. Si bien las funciones a realizar varían de la estación base a los nodos, la capa de aplicación de ambos elementos cuenta con la misma estructura de programación. La capa de aplicación se encuentra dividida en tres secciones: inicialización, máquina de estados y toma de decisiones. La Figura 3.6 muestra de manera gráfica la estructura de la capa de aplicación propuesta, donde el primer paso es la inicialización. Una vez inicializado el módulo, el programa entra a la máquina de estados (a). Dependiendo de el estado en que se encuentre el dispositivo, éste interactúa con la antena, ya sea enviando datos o recibiendo los (b1, b2). Por lo general después de realizar un envío o transmisión de paquetes, el módulo se mantiene en estado de recepción. Al recibir un paquete (b2) el *software* entra a la sección de toma de decisiones. Una vez determinada que tarea realizar en base a la información recibida, regresa de nuevo a la máquina de estados (c) desde donde, según sea necesario, se enviarán paquetes a la antena para su transmisión o se regresará a la sección de toma de decisiones para completar la tarea (d).

A continuación se describe cual son las funciones que presentan cada una de estas secciones dentro de la capa de aplicación.

#### Inicialización

Como se muestra en la Figura 3.6, ésta es la primera sección del *software*. En ésta se lleva a cabo la declaración de variables y configuración tanto de atributos propios del microcontrolador como de sus periféricos (puerto serie, convertidor A/D, temporizadores, etc). Tal como su nombre lo indica, esta sección se encarga de inicializar el módulo para su posterior funcionamiento. Es muy similar para los nodos como para la estación base. La diferencia principal que presentarán uno respecto al otro es la elección de periféricos necesarios.

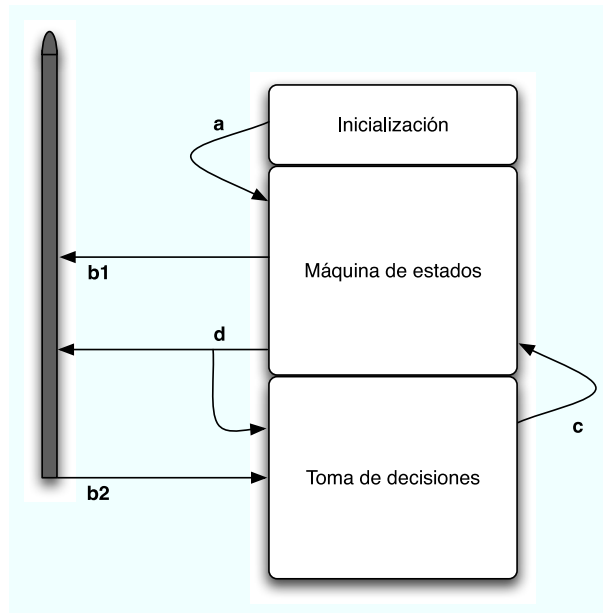


Figura 3.6: *Interacción entre las tres secciones del software*

### **Máquina de estados**

Si bien la inicialización de ambos elementos es muy similar, al ser diferentes las funciones que deben desempeñar en la red necesariamente los nodos deben estar cargados con un código de programación diferente a la estación base, de tal manera que ambos se complementen y realicen sus tareas. Internamente, el funcionamiento de cada elemento en la red está regido por una serie de estados definidos en el diseño de estos. El conjunto de estos estados es llamado máquina de estados. Tal como su nombre lo indica, el programa cambiará de estado según se requiera a lo largo de la aplicación. Estos estados son activados utilizando la serie de primitivas de control de SMAC, las cuales son expuestas en el Apéndice A. La máquina de estados podría considerarse como la columna vertebral de la capa de aplicación, pues es la sección del *software* que se mantiene más activa una vez que un módulo es inicializado. Esta estructura está compuesta por un ciclo `for` infinito, dentro del cual se encuentran las condiciones de decisión para que el elemento, sea un nodo o sea la estación base, realice la tarea necesaria en el momento adecuado.

Los estados principales por los que esta compuesta la máquina de la estación base

son:

- **IDLE\_STATE**: Estado ocioso. Cuando el microcontrolador se encuentra en este estado apaga momentáneamente algunas de sus funciones y periféricos, sin embargo puede salir de este estado al recibir alguna instrucción determinada
- **RECEIVER\_ALWAYS\_ON**: Estado de recepción. Pone en estado de recepción al módulo en la frecuencia de trabajo previamente seleccionada. De esta manera, el módulo se mantiene a la escucha de, en este caso, los nodos
- **ANSWER\_NODE\_REQUEST**: Estado de respuesta al nodo. Activa el estado de transmisión y contesta la solicitud de nombre de un nuevo nodo. Al hacerlo, la base le asigna un nombre único al nodo en la red, de tal manera que no se produzcan confusiones sobre los paquetes de información recibidos y el origen de estos
- **TRANSMIT\_ACK**: Estado de transmisión de confirmación. Activa el estado de transmisión y envía un mensaje de confirmación de recepción de datos. Al recibir esta confirmación el nodo continua con su rutina. De no recibir este paquete, se asume que la información enviada por el nodo no llegó de manera exitosa a la estación base, por lo que el nodo entrara al estado **TIMEOUT\_STATE**

La máquina de estados de los nodos comparte algunos estados con las de la estación base mientras que también tiene estados propios para cumplir con sus funciones. La máquina de estados de los nodos dentro de la red estrella primaria se forma de la manera siguiente:

- **IDLE\_STATE**: Estado ocioso
- **RECEIVER\_ALWAYS\_ON**: Estado de recepción. Pone en estado de recepción al módulo
- **NAME\_REQUEST**: Estado de petición de nombre. Activa el estado de transmisión y emite un mensaje de petición de nombre, conocido como petición de adopción. En caso que la estación base capte esta petición, ésta entrará al estado **ANSWER\_NODE\_REQUEST**

- **TRANSMIT\_DATA**: Estado de transmisión de datos. Activa el estado de transmisión y envía a la estación base un paquete formado por el nombre del nodo emisor y por los datos tomados de los sensores
- **TIMEOUT\_STATE**: Estado de tiempo fuera. El nodo entra a este estado si no recibe dentro de un tiempo determinado el mensaje de confirmación de recepción de datos de parte de la estación base. Al no recibir dicha confirmación se asume que la información transmitida por el nodo no llegó a su destino, por lo que retransmite nuevamente dichos datos y espera el aviso de confirmación. Este proceso de retransmisión puede ser efectuado hasta un máximo de 4 ocasiones. Después de eso se asume que la estación base se encuentra deshabilitada o el nodo fuera del área de cobertura

Se observa que una máquina de estados complementa a la otra para lograr la comunicación de manera sincronizada entre ambos dispositivos. Como regla general, cada vez que un módulo, sea éste un nodo o la estación base, envía una trama con información, requiere que el receptor envíe de vuelta un mensaje de confirmación de recepción. A este tipo de comunicación se le conoce como *handshaking*.

### **Toma de decisiones**

El ciclo `for` infinito de la máquina de estados es interrumpido al recibir alguna trama con paquetes siempre y cuando el último estado de activación haya sido el de recepción (`RECEIVER_ALWAYS_ON`). Cuando un módulo en estado de recepción capta una trama de paquetes, se produce una interrupción generada por una de las primitivas de SMAC la cual permite salir de la máquina de estados y entrar a la toma de decisiones. En esta sección del *software* se analizan las tramas recibidas, y, dependiendo del contenido de éstas, se realizan los procesos necesarios, ya sea dentro de esta sección del *software* o dentro de la máquina de estados. Estas dos secciones deben de trabajar coordinadas dentro de cada elemento de manera tal que, si éste recibe o envía una trama con una petición, pueda realizar la tarea solicitada y enviarla de regreso o pueda captar la información solicitada y realizar las funciones pertinentes según sea el caso.

### **3.4.2. Elementos de la red**

Como ya a sido mencionado, dentro de la red existen dos tipos de elementos complementarios. Cada uno de ellos cumple con un rol específico y fundamental

para el correcto funcionamiento de la misma. A continuación se describen ambos elementos y las tareas que desempeñan.

### **Estación base**

La estación base tiene como función condensar la información que cada uno de los nodos envía. Físicamente no es necesario que se encuentre en el campo. Ésta deberá estar comunicada con una PC a través del ducto RS-232 o puerto serie para que de esta manera los datos enviados por los nodos sean desplegados de manera gráfica y amigable para la comprensión de un usuario no familiarizado con esta tecnología. La estación base, al ser el concentrador de toda la información que circule en la red, preferentemente debe ser alimentado por una fuente constante de energía con el fin de evitar un apagón indeseado, lo que ocasionaría perder la información brindada por los nodos. La estación base es el elemento de mayor importancia jerárquica dentro de la red estrella primaria, ya que esta red podrá seguir funcionando si uno de sus nodos deja de funcionar, sin embargo dejará de ser útil si la estación base es inhabilitada, esto debido a que los nodos no pueden comunicarse directamente con la PC.

Con el fin de simplificar la nomenclatura dentro de la red, la estación base tiene como nombre una letra. En la red estrella, al existir tan solo una estación base, no existen problemas de asignación de nombres, y en este caso la base es nombrada con la letra A mayúscula, la cual, al igual que el resto de los caracteres alfanuméricos, utiliza un byte de espacio en memoria. La frecuencia de trabajo se encuentra en el canal 0 (2,405 GHz), pero es posible de ser necesario cambiar dicha frecuencia a cualquiera de los 15 canales disponibles. La Figura 3.7 muestra en forma resumida y en manera de diagrama de flujo el funcionamiento de la estación base.

### **Nodos**

El principio básico de funcionamiento de la red estrella primaria es que cada cierto tiempo los nodos envíen una trama de datos a la estación base. Antes de comenzar a enviar los datos recogidos por sus sensores, la primer tarea que realizan los nodos al encenderse es buscar una estación base con la cual asociarse. Cuando un nodo entabla comunicación con la estación base y ésta le contesta, se dice que el nodo fue adoptado. Una vez que un nodo recibe un mensaje de confirmación de adopción a la base, este puede proceder a enviar los datos que sus sensores le brindan.

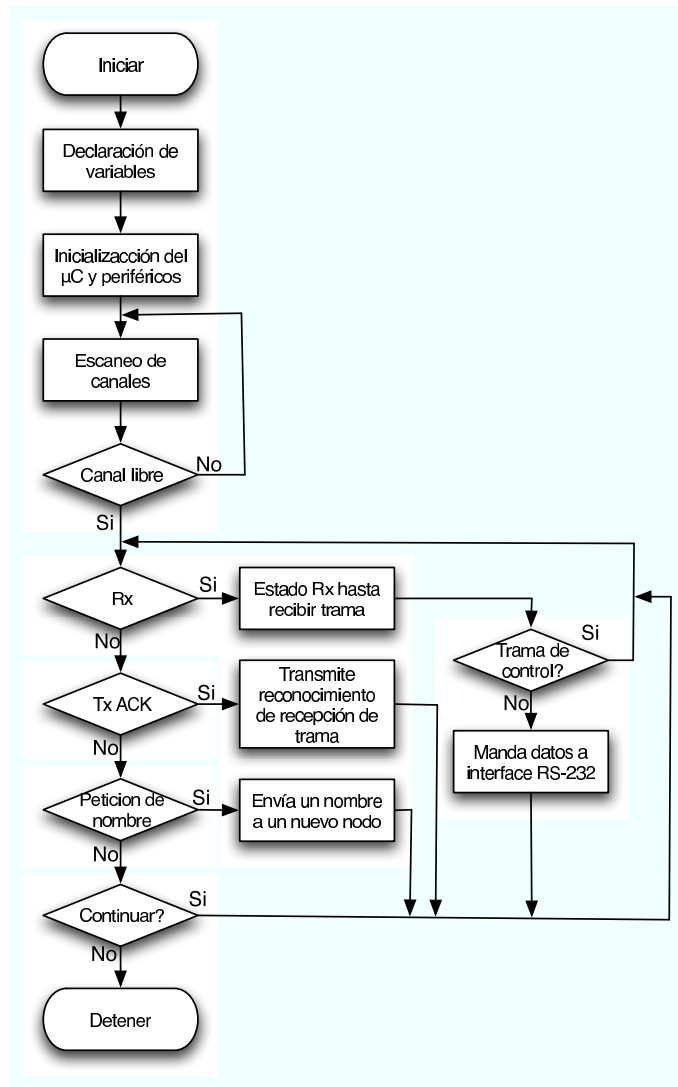


Figura 3.7: Diagrama de flujo reducido de la estación base

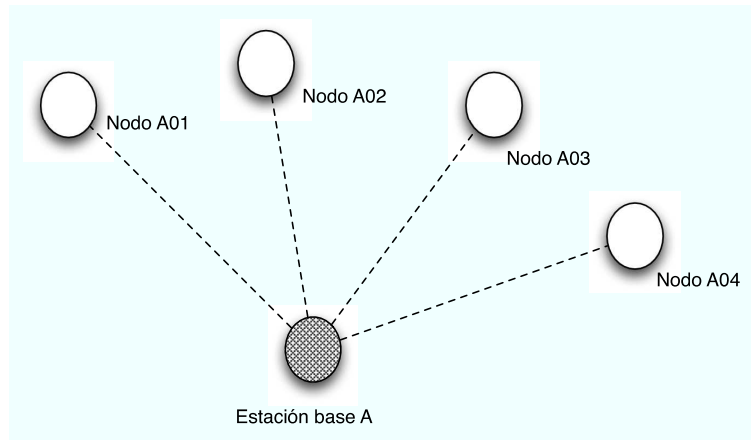


Figura 3.8: *Vecindad funcional de una red estrella con elementos nombrados*

Para identificarse unos de otros, cada nodo debe de tener un nombre irrepetible en la red conocido como nombre de nodo único o NNU. En las primeras versiones realizadas de la red estrella primaria los nodos que la constituían fueron preprogramados, al igual que la estación base, con un nombre específico. El nombre de cada nodo está formado por tres bytes donde el primero es el nombre de la estación base -es decir, A-, mientras que el segundo y el tercer byte representan un número, el cual debe de diferir del resto de los nodos. La Figura 3.8 muestra los nombres NNU tanto de los nodos como de la estación base en una red.

Pensando que esta red será instalada para realizar una tarea en el mundo real y que una de las características con la que debe de cumplir es la adaptabilidad, es resaltante que el hecho que cada nodo sea preprogramado con un nombre resta poder de autoconfiguración a la red, y por ende adaptabilidad, ya que el nombre de los nodos no puede ser modificado si fuera requerido. Teniendo en mente este punto y pensando en que se requiere un sistema que sea genérico y fácil de adaptar e instalar, surgió la necesidad de realizar nodos genéricos.

Los nodos genéricos, a diferencia de los nodos en las primeras versiones de la red estrella, no cuentan con un nombre de identificación preprogramado para identificarse en la red, sino que junto con la solicitud de adopción a la estación base también solicitan un NNU. Este nombre, al igual que en los casos previos, está formado por el nombre de la estación base y por un número de asignación, el cual se encuentra en función de la cantidad total de nodos que ya se encuentren asociados a la vecindad de la siguiente manera:

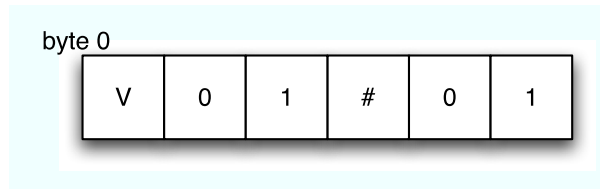


Figura 3.9: Trama del código de identificación único en cada nodo. Los primeros tres bits indican la versión del software y los últimos tres representan el número del módulo

$$\text{Número de asignación} = n + 1$$

donde  $n$  = número de nodos existentes en la red

En realidad cada nodo tiene un código de identificación único o CIU. Este código es el identificador real del nodo, sin importar si éste forma parte de una red o no. EL CIU es similar al mostrado en la Figura 3.9 y es utilizado para identificarse en cuanto se realiza una petición de adopción.

Cuando un nuevo nodo es inicializado, éste envía un mensaje de petición de adopción a la estación base junto con su código de identificación único. Por su parte, la estación base, la cual asignará el NNU a cada uno de los nodos, guarda una relación de cada nodo de su vecindad (CIU) y su nombre asignado dentro de la red (NNU) en una base de datos como la mostrada en la Tabla 3.2. De esta manera, la base, al captar el mensaje, realiza una búsqueda del CIU del nodo en la base de datos. Si el CIU no es encontrado significa que se trata de un nodo nuevo el cual está buscando formar parte de la vecindad, por lo que la estación base le otorga un nombre único dentro de la red (por ejemplo A01, A08, A16 según sea el caso), el cual le servirá para identificarse.

En caso que la estación base encuentre el CIU dentro de la base de datos, significa que el nodo anteriormente ya formaba parte de la red por lo que ya se le había asignado su NNU. Es por esta razón que la estación base, en lugar de generar un nuevo nombre único para el nodo, envía el NNU que ya se le había asignado con anterioridad. Este caso puede ocurrir cuando un nodo que ya formaba parte de la red es inhabilitado o apagado, por ejemplo debido al agotamiento de energía en sus baterías o por apagarlo manualmente con el fin de reposicionarlo físicamente y volverlo a prender. La Figura 3.10 muestra en forma resumida y en manera de diagrama de flujo el funcionamiento de los nodos.



<b>Código de identificación único (CIU)</b>	<b>Nombre de nodo único (NNU)</b>
V01#01	A01
V01#08	A02
V01#05	A03
V01#03	A04
V01#12	A05

Cuadro 3.2: *Ejemplo de la base de datos generada por la estación base A relacionando CIU - NNU de cinco nodos*

Una vez que un nodo es adoptado por la estación base, éste es habilitado para realizar sus funciones de medición. Para pruebas de laboratorio se utilizó una frecuencia de muestro de 5 seg. Esto para realizar un número considerable de pruebas en un tiempo pequeño. Sin embargo, en la aplicación real esta frecuencia de muestro será mucho menor, ya que las variables a medir -temperatura y humedad- no cambian abruptamente.

En [7] se muestra un estudio de tiempo de absorción de agua en sedimentos locales utilizando un sensor de fibra óptica de plástico. La Figura 3.11 muestra la relación intensidad-tiempo al humedecer una muestra de tierra. La prueba tuvo una duración de 25 horas. El área entre los límites a) y b) muestra el tiempo en que ocurre la transición de seco a húmedo (los primeros minutos) y la transición húmedo a seco (a partir aproximadamente del minuto 900) en el experimento. El área delimitada entre b) y c) indica el tiempo en que la muestra se mantuvo húmeda, alcanzando en 0.4 V la máxima saturación de humedad. Estos resultado comprueban que la tasa de cambio de la humedad en el suelo es de muy baja velocidad, lo que hace innecesario realizar muestreos en intervalos de tiempo pequeños.

### **3.4.3. Tramas de la capa de aplicación**

Se le conoce como trama al conjunto de paquetes, separados en bytes y siguiendo un protocolo común, que son enviados desde un transmisor a un receptor buscando comunicar un módulo con otro con el fin de enviar instrucciones o datos. La Figura 3.4 en el Capítulo 3 muestra la trama utilizada por el protocolo SMAC. Como fue explicado en esa sección, es en el bloque Payload Data de la trama SMAC donde se colocan los bytes de las tramas de la capa de aplicación, de esta manera la trama SMAC funge como vehículo para transportar las tramas de la capa de aplicación. Éstas se encuentran delimitadas por un byte final conocido

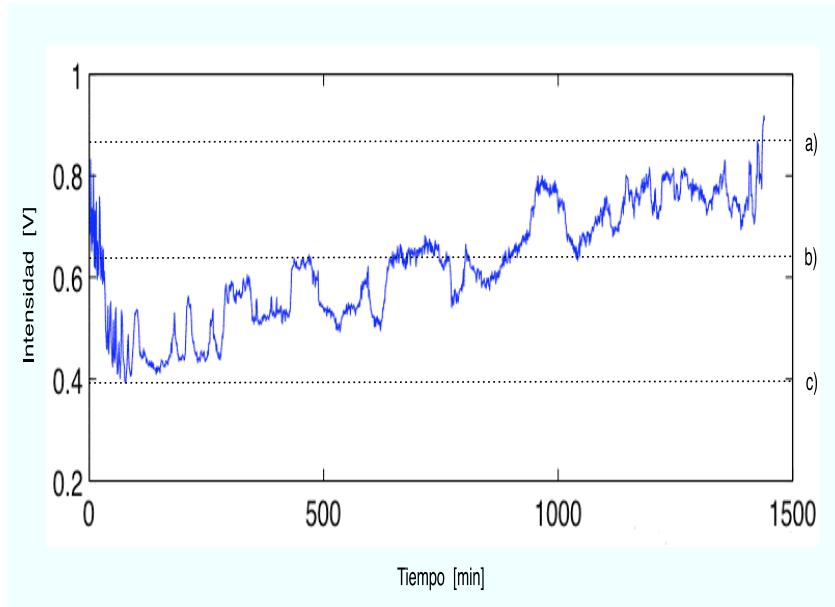


Figura 3.11: *Relación intensidad-tiempo en medición de humedad en una muestra de tierra*

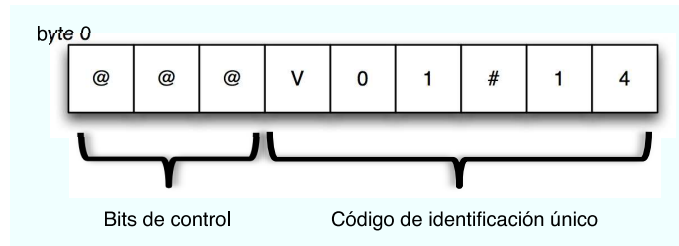


Figura 3.12: *Ejemplo de trama de petición de nombre de nodo nuevo*

como fin de línea y previamente definido por el programador.

Para la comunicación estación base - nodo existen tres tipos de tramas. Todas las tramas cuentan con un identificador, ya sea ciertos bytes de control predefinidos o el NNU del módulo, los cuales indicarán al receptor cual es la función de la trama. A continuación se describen los tres tipos de tramas definidos.

### **Trama de petición**

Este tipo de trama es la utilizada por los nodos nuevos al realizar una solicitud de adopción a la estación base. Los primeros tres bytes son de control, indicando al receptor (la estación base) cual es el propósito de la trama. El resto de la trama lo conforma el código de identificación único o CIU. Este código de identificación es irreplicable para cada módulo, sin embargo no es el nombre que el nodo tomará en la red. La Figura 3.12 muestra la trama enviada por el nodo V01#14 a la estación base esperando ser adoptado por ésta.

### **Trama de control**

Generalmente es la respuesta otorgada a una trama de petición, tal como la otorgación de nombre a un nodo después de éste solicitar su adopción.

### **Trama de información**

Tal como su nombre lo indica, la finalidad de este tipo de trama es enviar información, sea esta solicitada o no. Dentro de las tramas de información hay dos tipos. La primera es la respuesta a solicitud de nombre, donde la estación base envía al nodo nuevo el nombre que tendrá éste dentro de la red. La segunda es la transmisión de datos, donde un nodo que ya forma parte de la red envía a la

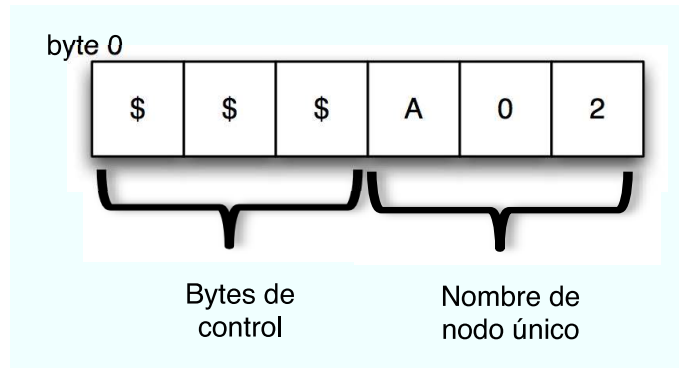


Figura 3.13: *Ejemplos de trama de control. Asignación de nombre de la base A a nodo nuevo*

estación base los datos que sus sensores brindaron. En la Figura 3.14 se encuentran ilustrados ambos tipos de tramas.

### Trama de ACK

Llamada también trama de confirmación, es en realidad un tipo de trama de información. Esta trama es emitida únicamente por la estación base para los nodos. Cada vez que un nodo emite una trama de información con la lectura de sus sensores, y esta trama es recibida por la estación base, ésta emite una trama de ACK, la cual le permitirá al nodo continuar con sus tareas.

### 3.4.4. Comunicación sensor - nodo

Si bien el desarrollo de la etapa de adquisición de datos, al igual que la interfaz gráfica, no forman parte de los objetivos de este trabajo de tesis, si son parte integral del proyecto. Con el fin de llevar un control de tiempos riguroso se utilizó la función de interrupción 14 provista por el microcontrolador llamada TMP2OF, la cual obedece al desbordamiento de un temporizador en cuenta regresiva. El control tanto del temporizador como de la interrupción son explicados a detalle en [30]. Se configuró el temporizador para realizar una cuenta regresiva de un segundo de duración. Cada vez que dicho temporizador expira, se produce un efecto de interrupción en la lógica secuencial que rige a la máquina de estados. Se configuró el sistema de tal manera que al producirse esta interrupción el programa

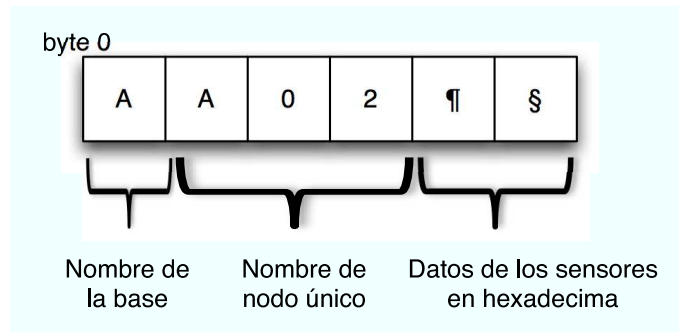


Figura 3.14: *Ejemplos de trama de información de sensores de nodo A02 a base A*

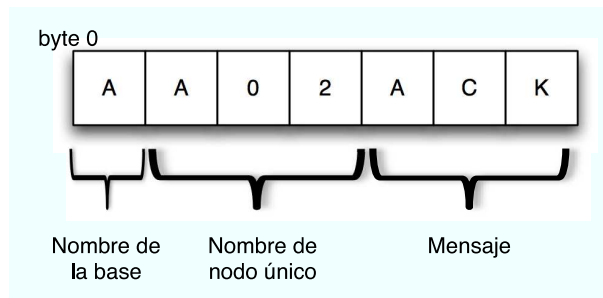


Figura 3.15: *Ejemplo de trama de confirmación de la estación base A al nodo A02*

lea los datos adquiridos, ya sea de su ADC si se trata de un sensor analógico, o a registros previamente declarados si se trata de un sensor digital, permitiendo de esta manera realizar una lectura cada segundo. Se agregó un contador de interrupciones, de tal manera que al fijar un número de interrupciones y contabilizarlas, es posible controlar la frecuencia de muestro de los sensores. Es decir: si se requiere realizar la lectura de los sensores cada 5 segundos -tal como se utilizó para las pruebas de laboratorio-, el programa contabiliza 4 interrupciones y a la quinta procederá a leer los datos. Como el nodo no se encuentra realizando otra función mientras el temporizador está activado, es factible mandarlo al estado de hibernación con el fin de optimizar la energía de sus baterías. El nodo despertará del estado de hibernación cada vez que se produzca una interrupción TMP2OF. Si no es necesario leer los datos de los sensores, el nodo puede ingresar al estado de hibernación de nuevo. Gracias a esto es posible que el nodo se encuentre en estado de hibernación y salga de este estado una vez cada segundo durante unos pocos milisegundos, logrando de esta manera mantener un bajo consumo de energía la mayor parte del tiempo.

### **3.4.5. Comunicación estación base - PC**

Para comunicar la estación base con una PC con el fin de trasladar los datos provistos por los sensores y conocerlos de manera gráfica se utilizó el cable convertidor puerto serie-usb modelo USB-SER de *Steren* el cual es mostrado en la Figura 3.16.

### **3.4.6. Encapsulamiento**

Como ya fue mencionado, el diseño de los elementos que conforman la red no solo trata del *software*, sino también de cada uno de los elementos físicos que se requieren utilizar. Con el fin de brindar un encapsulado seguro a la circuitería de cada uno de los módulos se buscó un contenedor o *housing* diseñado para exteriores. Se eligió el modelo OD45 de la compañía *Pactec*<sup>®</sup> tal como el mostrado en la Figura 3.17. Esta elección fue ventajosa debido a sus dimensiones y características, entre las cuales destaca su material de fabricación, el hecho que cuentan con un sellador plástico u *o-ring* para aislar el interior en caso de que el contenedor sea expuesto al agua, y su recubrimiento especial contra rayos ultravioleta, lo cual aumentará su tiempo de vida útil.



Figura 3.16: *Cable convertidor serie a USB Steren*



Figura 3.17: *Contenedor o housing utilizado para resguardar los módulos*

## **3.5. Red jerárquica**

Con la configuración de estrella primaria es posible implementar una red en un escenario real. Es sabido que independientemente de las características en potencia, solo realizando pruebas en un escenario real se puede saber a que distancia es posible posicionar los nodos. Para el fin que se persigue con el diseño y la posterior implementación de esta red, la red estrella primaria puede ser de gran utilidad, ya que varios campos vitivinícolas de la región se manejan en pequeños sembradíos, donde cada uno tiene que guardar ciertos parámetros de humedad y de estrés hídrico para producir el vino deseado.

Sin embargo, la red estrella propuesta se encuentra muy limitada si se requiere monitorear áreas mayores. Si bien es cierto que algunas casas dedicadas a la elaboración del vino tienen campos vinícolas relativamente pequeños, las hay, en su mayoría, las que tienen campos de varias hectáreas de área, en las cuales la red estrella podría resultar ineficiente.

Tomando como base la red estrella, se buscó cubrir un área mayor de terreno. Partiendo de este concepto se ideó el crear varias vecindades formadas cada una por su estación base y varios nodos donde las estaciones base no están conectadas a una PC, sino que cada una de ellas respondan a un tercer elemento a la red: el coordinador general. Para ingresar este nuevo elemento a la red y lograr la coordinación funcional entre todos los componentes de ésta fue necesario realizar importantes cambios en la programación de los nodos y la estación base. La Figura 3.18 muestra a manera gráfica los tres elementos que componen esta nueva topología e indica el flujo de comunicación entre ellos donde las líneas continuas representan las tramas de control y de ACK mientras que las líneas punteadas representan tramas de petición y de información. Se observa que los nodos nunca tienen comunicación directa con el coordinador general ni viceversa, sino que las estaciones base de cada vecindad funcionan como puente entre ambos. En esta nueva topología las estaciones base desempeñan un papel fundamental, ya sus funciones van más allá de nombrar nodos de su vecindad y recibir datos de éstos.

A continuación se describen las características básicas con las que cada elemento debe de cumplir para coexistir en la red.

### **3.5.1. Coordinador general**

Este elemento es el nuevo condensador de la información circulante en la red. Al igual que la estación base en la red estrella primaria, éste es también un dis-

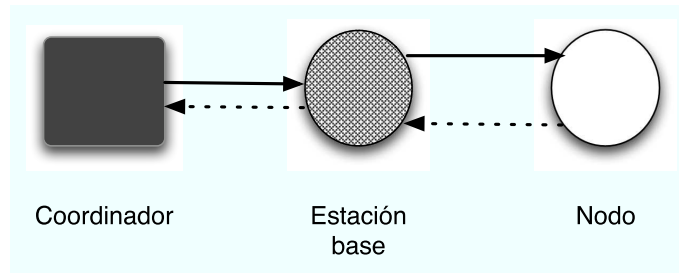


Figura 3.18: *Flujo de comunicación entre el coordinador general, estación base y nodos*

positivo FFD. El coordinador general es elemento de la red que se encuentra en comunicación con una PC a través de su puerto serie. Como se ilustra en la Figura 3.18 tiene comunicación directa con las estaciones base. Las tareas que desempeña dentro de la red son:

- Escuchar y nombrar a las estaciones bases que se activen
- Recibir el paquete de información que éstas le envían cada cierto tiempo
- Transmitir la información recibida a una PC vía RS-232

Debido a su importancia jerárquica es el primer dispositivo que debe ser encendido al inicializar la red, y dada su importancia como condensador y transmisor de información a la computadora, su fuente de energía debe ser en todo tiempo constante. Solo existe un coordinador general en toda la red, y sus tareas, aunque pocas en relación con los demás elementos, son de vital importancia para el funcionamiento de la red. El coordinador general trabaja en el canal 15 (2.480 GHz). Este canal se encuentra restringido en uso solo para el coordinador y por las estaciones base cuando estas envíen los datos proveídos por sus nodos.

### **3.5.2. Estación base**

Con las modificaciones realizadas, las estaciones base se convirtieron en el elemento protagónico de la red. Son los dispositivos con más carga laboral, y es importante que su fuente de energía no falle. Es factible alimentarlos con baterías tipo AA. Las estaciones base son el segundo elemento que debe ser encendido al inicializar una red. Internamente sufrieron un cambio muy grande en relación

con la estación base única existente en la red estrella primaria. Debido a que en esta nueva red deben coexistir varias estaciones base simultáneamente, es de gran importancia asegurarse que cada una de ellas tengan un nombre único. En las primeras versiones de esta red jerárquica, al igual como pasó con los nodos de las primeras versiones de la estrella primaria, las estaciones bases funcionaban con un nombre previamente asignado por el programador. Si bien esto no representaba gran problema, tampoco representaba un avance para la red. Una de las características principales con la que debe cumplir la red estrella primaria, y por ende la red jerárquica, es el que sea autoconfigurable. Esta característica se veía limitada con las estaciones base preprogramadas con un nombre único. Por tal motivo se manipuló y adaptó el algoritmo de asociación de los nodos con el fin de que pudieran coexistir varias estaciones base con sus propios nodos. Debido a que la red puede tener varias vecindades, y a su vez cada vecindad puede estar formada por varios nodos, cada estación base trabaja en un canal frecuencial diferente. Al inicializarse una estación base, ésta realiza un escaneo frecuencial, comenzando por el canal 0, enviando un mensaje el cual solo atenderá otra estación base en caso de estar trabajando en el mismo canal. Este barrido frecuencial es realizado con el fin de encontrar un canal libre, es decir, un canal donde no se encuentre otra estación base trabajando. Si la nueva estación base recibe un mensaje de respuesta, cambia su frecuencia de trabajo al siguiente canal y vuelve a realizar una búsqueda. En el momento que la nueva estación base envíe un mensaje de escaneo en un canal y no reciba respuesta en un tiempo determinado, se asume que el canal se encuentra libre por lo que la estación avisa al coordinador general cual es su frecuencia de trabajo. De esta manera se utilizan varios de los canales disponibles y se produce menos estrés en la red, pues una vez que un nodo es adoptado por una estación base, solamente ésta podrá escuchar al nodo. Trabajando de ésta manera es posible formar una red con 14 vecindades cada una trabajando a una frecuencia diferente sin interferir unas con otras. Como ya fue mencionado, a fin de comunicarse con el coordinador general las estaciones base deben de cambiar su frecuencia de trabajo al canal 15. Una vez completada el envío de datos y recibida la trama de ACK de parte del coordinador deben de regresar a su canal de trabajo original.

Las estaciones base cumplen con una gran cantidad de tareas, entre las que destacan:

- Escanear los canales disponibles y seleccionar uno
- Atender las peticiones de nodos, tanto en la solicitud de nombre como a los que ya formen parte de su vecindad

- Mantenerse en comunicación con sus nodos
- Coordinar a su vecindad
- Enviar la información de su vecindad al coordinador general

### 3.5.3. Nodos

Con la posibilidad de existir varias estaciones base en la red, las capacidades de los nodos tuvieron que ser incrementadas. Estos siguen siendo genéricos, sin embargo su proceso de adopción es más elaborado que en la red estrella primaria. Al prenderse, un nuevo nodo envía una petición de adopción a todos los canales no reservados iniciando por el canal 0. Si una estación base le contesta, el nodo guarda en memoria los datos recibidos: nombre de la estación y nombre NNU propuesto por la base. Adicionalmente, al recibir el paquete con dicha información, el nodo calcula el LQI con que recibió éste y lo guarda junto con los datos anteriores y con el número de canal de trabajo de dicha base. Este proceso es repetido a lo largo de los primeros 14 canales disponibles. Una vez terminado el escanéo, el nodo determina con que base asociarse en relación directa con el LQI recibido. Realizando un proceso de comparación, el nodo se asociará con la estación base con la cual haya presentado un LQI más alto. De esta manera se garantiza la mejor conexión, pues al estar asociado con la base con la que presentó mejor LQI se corren menos riesgos de pérdidas de paquetes o información errónea en la transmisión de datos.

Los nodos nunca interactúan entre sí ni interactúan directamente con el coordinador general, sino tan solo mantienen comunicación con su estación base. Un nodo solamente puede formar parte de una vecindad. Recordando que el protocolo de comunicación entre estación base y nodos es del tipo *handshaking*, cada vez que un nodo envía un paquete de datos espera una trama de ACK de parte de su estación base como confirmación de recepción, lo que le permite al nodo continuar trabajando. Al igual que en la red estrella primaria, al no recibir una trama de ACK después de enviar un paquete de datos, el nodo entra en el estado `TIMEOUT_STATE` realizando una retransmisión de los datos. Si al cabo de cuatro retransmisiones el nodo no recibe una trama de ACK, éste asume que su estación base se encuentra deshabilitada, por lo que procederá a buscar otra estación base con la cual asociarse realizando nuevamente un escanéo a lo largo de los 14 canales. El nodo se asociará con la estación base con la que presente un mejor LQI. Esta característica de los nodos brinda un alto nivel de autoconfiguración a la red,

ya que este proceso se desarrolla sin la intervención del usuario. De ésta manera, gracias a la flexibilidad de la red es posible que los nodos cuya estación base no se encuentre en posibilidades de trabajar sigan funcionando dentro de la red. La Figura 3.19 muestra de manera gráfica el comportamiento de los nodos de una vecindad cuando su estación base deja de funcionar.

A continuación se puntualizan algunas de las funciones con las que cumplen los nodos.

- Escanear los canales 0 al 14 buscando una base a la cual asociarse
- Asociarse a la vecindad con la cual presente un mejor LQI
- Transmitir la información de sus sensores a su estación base
- En caso de perder comunicación con su estación base, el nodo debe de realizar nuevamente una petición de adopción

### **3.6. Asociación de bases y asociación de nodos**

Como ya fue mencionado, el coordinador general estará en comunicación con la PC y es el primer elemento en la red que debe de ser energizado. Una vez que el coordinador general se encuentra encendido es el turno de las estaciones base. Al prender la primera estación base, ésta realiza un escaneo a lo largo de los primeros 14 canales disponibles iniciando en el canal 0 (2.405 GHz). Se realiza este barrido frecuencial con el fin de encontrar un canal libre, es decir, encontrar un canal en donde no se encuentre otra estación base trabajando. La estación base envía un mensaje el cual solo atenderá otra base, en el caso de existir. Si la estación base recibe un mensaje de vuelta, significa que ya existe otra estación trabajando a esa frecuencia, por lo que procederá a cambiar de canal y enviar de nuevo un mensaje. En caso de no recibir ningún mensaje de vuelta al cabo de un tiempo determinado, la estación base asume que el canal en que se encuentra es libre y procede a tomarlo. Si se trata de la primera estación base, esta trabajará en el canal 0 y tomará como nombre la letra A mayúscula. Al encender una segunda base, ésta recibirá el aviso de parte de la estación A que el canal 0 se encuentra ocupado, por lo que procederá a escanear el canal 1. En este caso dicha base trabajará en el canal 1 y tomará como nombre la letra B mayúscula. En la red pueden existir hasta 14 estaciones base, las cuales trabajarán de los canales 0 al 13. El canal 14 está reservado para la comunicación entre las estaciones base y el coordinador general. Una vez que una base es inicializada, ésta permanece encendida

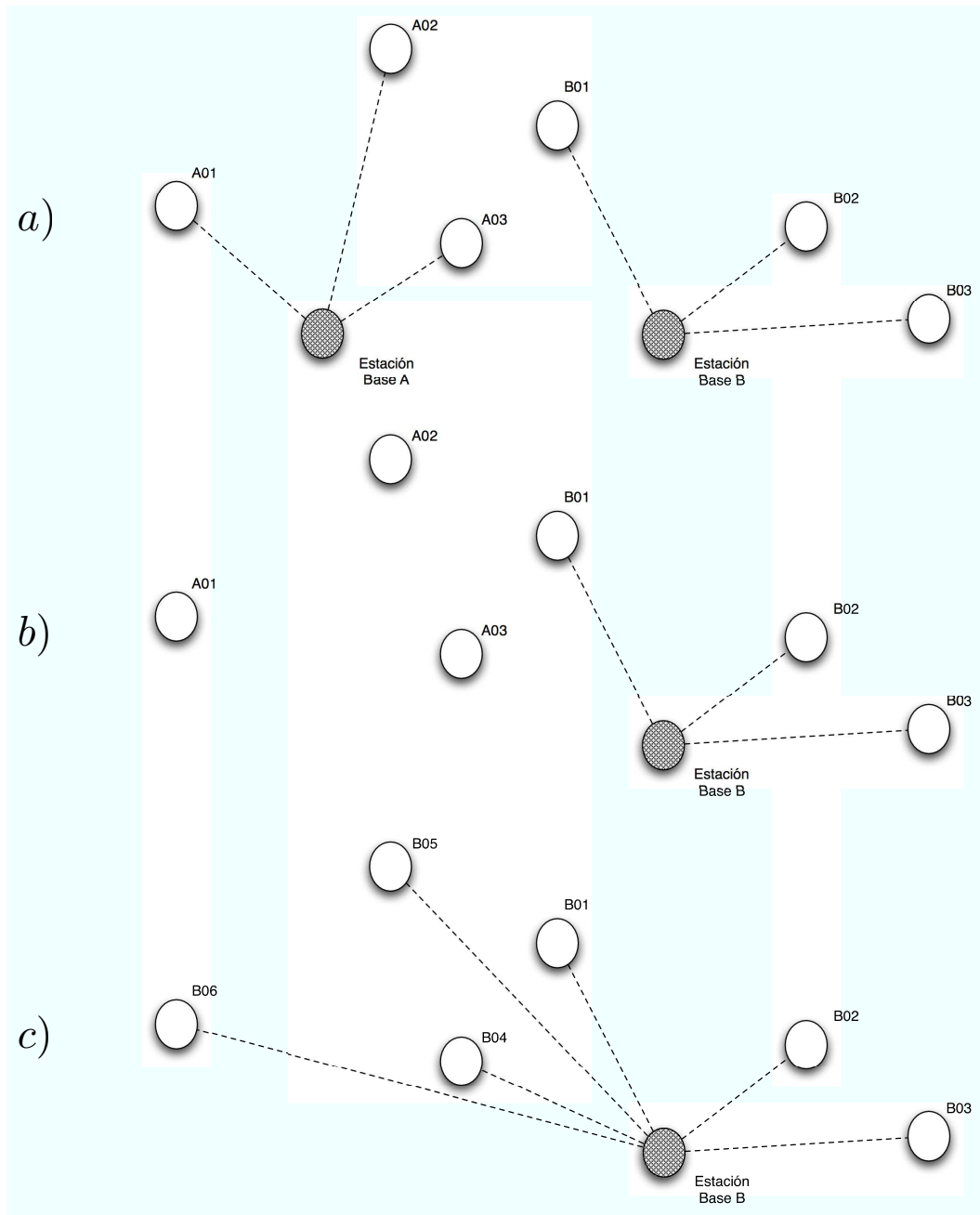


Figura 3.19: Reasociación de los nodos de la vecindad A a la vecindad B. a) Las dos vecindades trabajando. b) La estación base A deja de funcionar. c) Los antiguos nodos de la vecindad A se asocian a la vecindad B

y en estado de recepción, esperando por solicitudes de nombres de nuevos nodos. Una vez que ya se encuentran las estaciones base necesarias encendidas, se procede a prender los nodos. Al prender un nodo, la primera tarea que este realiza es buscar en los primeros 14 canales comenzando por el canal 0 una estación base con la cual asociarse. Para lograr esto el nodo manda un mensaje de control en el primer canal. Una vez realizada la petición de nombre, se activa en el nodo un contador regresivo como tiempo de espera para una respuesta. En caso de realizar una petición de nombre en un canal donde no se encuentre trabajando ninguna estación base, el contador regresivo expirará, dando como señal al nodo que no existe ninguna estación base trabajando a esa frecuencia, por lo que procederá a cambiar de canal y volver a realizar una petición. Si existe una estación base trabajando a esa frecuencia, ésta manda una respuesta al nodo proponiéndole un nombre. Al igual que en el caso de la estrella primaria, la nomenclatura del nombre propuesto está compuesta por el nombre de la base y un número de asignación igual a  $n + 1$ , donde  $n$  es el número de nodos asociados a la estación base hasta ese momento. Cuando el nodo recibe la información con el nombre propuesto, este almacena los datos recibidos y realiza el cálculo del LQI con el cual recibió la trama.

### 3.7. Dinámica de trabajo de las vecindades

Los nodos de la red estrella primaria, una vez adoptados por la estación base, proceden a enviar datos cada cierto tiempo con una periodo conocido y constante entre muestra y muestra. Estos datos son tomados directamente y enviados a la PC por su despliegue gráfico. Sin embargo, debido a que en esta nueva red cada estación base recibe datos de los nodos con los que forma una vecindad, y a su vez el coordinador general recibe datos de las estaciones base, surge la necesidad de crear un proceso de sincronización en la red. En este proceso existen tres variables importantes, las cuales son:

- $x$  = Número de muestras por bloque de sincronización. Un bloque de sincronización está compuesto por un número específico de muestras. Al llegar a la última muestra del bloque ( $x$ ) se produce un evento de sincronización que inicia un nuevo bloque
- $\alpha$  = Periodo de muestreo 1. Tiempo transcurrido entre una muestra y otra antes de la primera sincronización de un nodo

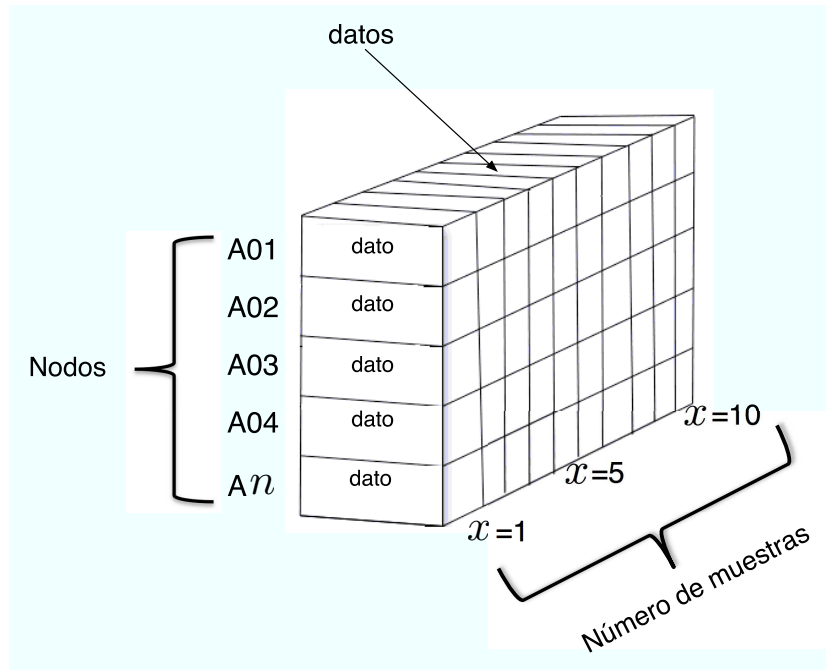


Figura 3.20: Ejemplo gráfico de la estructura matricial dentro de las estaciones base para guardar los datos de cada nodo

- $\beta$  = Periodo de muestreo 2. Tiempo transcurrido entre una muestra y otra después de la primera sincronización de un nodo

Los experimentos de prueba fueron realizados con periodos de muestreo  $\alpha = 20$  seg y  $\beta = 1$  min, y con un número de muestras  $x = 10$ . De esta manera, la estación base recibía un dato cada 20 segundos iniciando con la primera muestra en el segundo 0 hasta llegar a la décima muestra (segundo 200) para finalizar el bloque.

La estación base guarda los datos en un arreglo tipo matricial como la mostrada en la Figura 3.20. La estación base debe de conocer el número de muestras que forman un bloque de sincronización. De esta manera, al llegar al décimo dato, la estación base envía una trama de control al nodo ordenándole detener sus funciones. A continuación la estación base procede a realizar un promedio con los 10 datos del bloque de sincronización y envía un único dato promediado al coordinador general. De esta manera un nodo envía datos a su estación base cada minuto y la estación base envía los datos de ese nodo en un solo paquete promediado

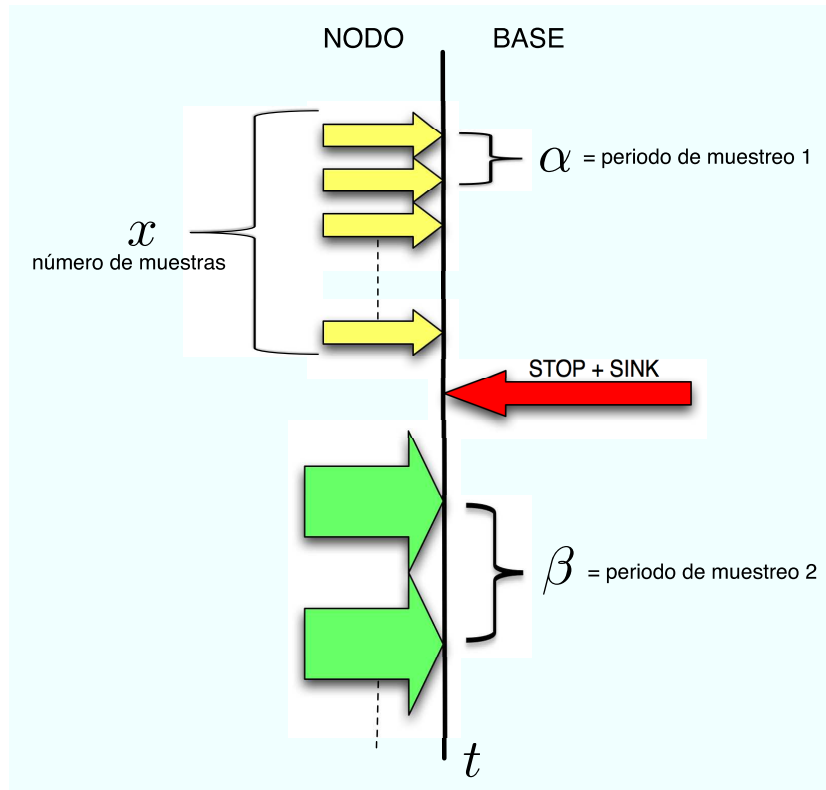


Figura 3.21: Ilustración del método de sincronización del primer nodo

cada diez minutos al coordinador general. La Figura 3.21 muestra el proceso de sincronización del primer nodo asociado a una estación base.

Los nodos utilizarán solamente el primer periodo de muestreo durante su primer bloque de sincronización. Una vez sincronizado, el nodo cambiará al periodo de muestreo 2 y seguirá siendo sincronizado cada  $x$  muestras, pero sin cambiar más el periodo de muestreo. El porque se trabaja con dos periodos de muestreo diferentes se explica al recordar que una estación base puede trabajar con varios nodos a la vez. El primer nodo adoptado marcará el inicio de la sincronización, ya que cuando éste llegue a su décima muestra se producirá un efecto de sincronización como el mostrado en la Figura 3.21. Una vez sincronizado, el primer nodo continua trabajando con el periodo de muestreo 2.

Cuando un segundo nodo se asocia a la vecindad, éste comienza trabajando con el periodo de muestreo 1, independientemente del primer nodo. Cuando el primer

nodo, ya sincronizado, llega a su muestra  $x - 1$  (muestra novena para el presente caso), la estación base comunica al nuevo nodo a través de una trama de ACK modificada que próximamente se va a realizar un evento de sincronización, por lo que el nuevo nodo entra al estado de recepción (RECEIVER\_ALWAYS\_ON) esperando ser sincronizado. La Figura 3.22 ilustra lo antes mencionado.

El proceso de sincronización por parte de la estación base está formado por 4 pasos: detener todos los nodos, seleccionar el primero, promediar los 10 datos de éste, enviar el promedio del nodo al coordinador general y sincronizar el nodo otorgándole un número de sincronización, el cual le indicará el tiempo en que debe de transmitir sus datos. Este número es secuencial, por lo que los nodos sincronizados transmitirán sus datos uno después de otro en orden, evitando pérdidas de paquetes por choques de tramas en el aire.

Tanto el número de muestras  $x$  como los periodos de muestreo  $\alpha$  y  $\beta$  pueden ser modificados de ser necesario. En base a lo observado en la Figura 3.11, se sabe que la frecuencia necesaria entre muestra y muestra no necesita ser alta. El realizar un muestreo cada minuto durante un bloque de diez minutos y promediar los datos obtenidos permite obtener un dato de mayor precisión, además que enviar un dato cada diez minutos al coordinador general para que éste lo despliegue en la interfaz gráfica es suficiente para conocer la humedad en el suelo y observar su comportamiento cuando el campo se encuentra en un nivel hídrico bajo o cuando éste es regado.

De esta manera es posible se sincroniza cada vecindad, independientemente unas de otras. La sincronización permite agregar nuevos nodos a la red en cualquier momento y seguir manteniendo un orden secuencial para la transmisión de datos. La Figura 3.23 muestra un ejemplo de la red jerárquica. En este caso con una sola red se cubre una extensión al menos tres veces mayor que con una red estrella primaria.

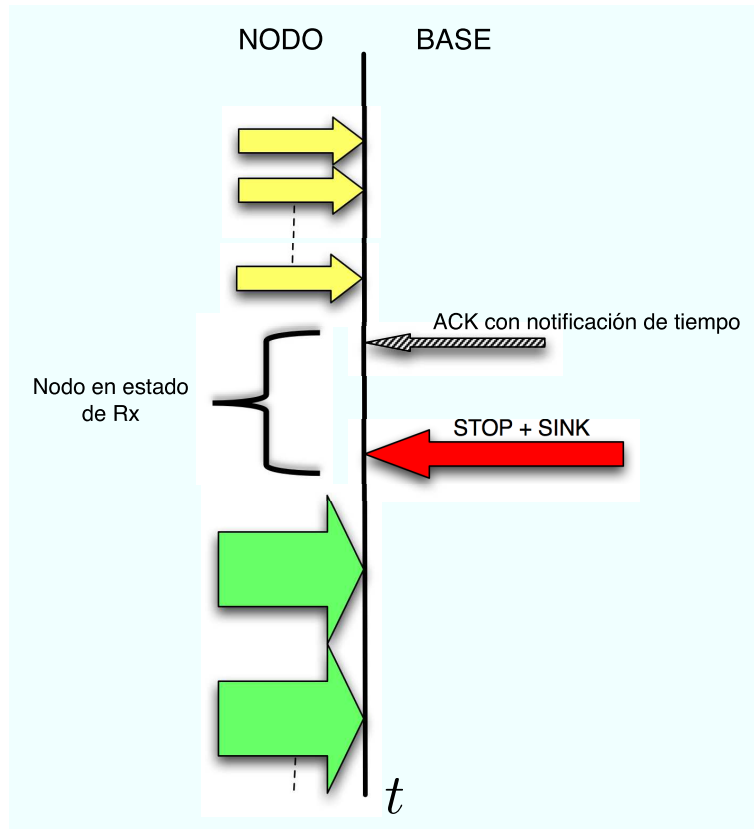


Figura 3.22: Ilustración del método de sincronización de un nuevo nodo cuando ya hay nodos sincronizados

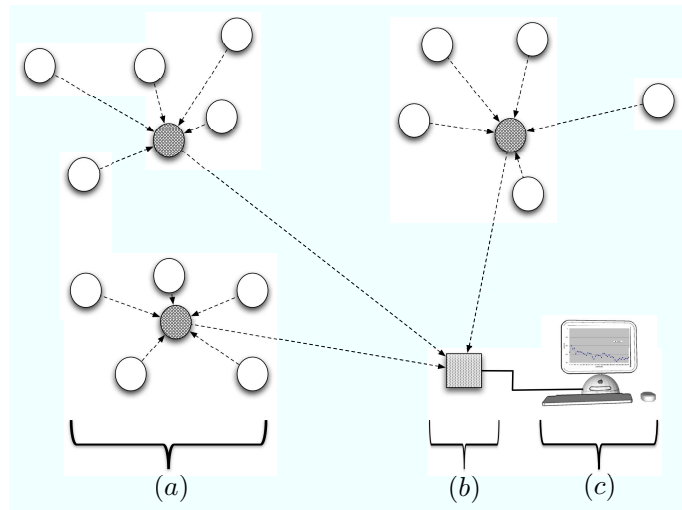


Figura 3.23: *Diagrama de una red con tres vecindades*

# Capítulo 4

## Pruebas y resultados

En este capítulo se describen las pruebas realizadas, tanto para la red estrella primaria como para la red extendida y se presentan los resultados de los mismos.

### 4.1. Pruebas de potencia y alcance

En primer lugar se caracterizaron los módulos Tx-Rx. Existen dos parámetros de fundamental importancia: la potencia de transmisión de los módulos y el patrón de radiación de la antena impresa. Si bien es cierto que en la literatura ya se encuentran definidos dichos parámetros [28] y [2], se consideró importante realizar pruebas en escenarios específicos para conocer el alcance real de los módulos, es decir, determinar a manera de referencia la distancia máxima de transmisión de datos bajo los requerimientos establecidos en el estándar.

Se seleccionaron diversos escenarios de prueba con características variadas. Se realizaron pruebas primarias dentro de edificios, al aire libre y cerca del mar. La Figura 4.1 muestra el escenario de pruebas al aire libre. La principal ventaja de realizar pruebas en este lugar fueron: el nivel del piso y la falta de obstáculos en línea de vista.

Para realizar las pruebas de potencia contra distancia se utilizó una plantilla del software *Beekit* de *Freescale*<sup>®</sup> con el protocolo mínimo de enlace, el cual fue ligeramente modificado. Las pruebas consistieron en programar uno de los módulos PAN802154 para que funcionara como transmisor (Tx), con el propósito de enviar un número determinado de paquetes. Otro módulo, programado como receptor (Rx) fue colocado a una distancia previamente determinada y a línea de vista del transmisor. El receptor, al captar los paquetes emitidos por el transmisor,



Figura 4.1: *Escenario principal de pruebas*

los contabilizaba para calcular la calidad de enlace (LQI) de cada uno de ellos. el LQI se encuentra en dBm, donde

$$x\text{dBm} = 10\log\left(\frac{P}{1\text{mW}}\right)$$

donde  $P$  es la potencia de mW

De esta manera, al conocer el número de paquetes enviados, el número de paquetes recibidos y finalmente el LQI de cada uno de ellos fue posible realizar cálculos estadísticos para conocer el desempeño de los módulos. Al realizar esta prueba se modificó en varias ocasiones la distancia entre el transmisor y el receptor. Finalmente, en base a los primeros datos se determinó iniciar con una distancia de separación igual a 20 m, esto debido a que a menores distancias se presentarán menores fluctuaciones en potencia. Por otro lado, en una aplicación real, el transmisor generalmente estará alejado del receptor más de 20 m. La prueba se repitió incrementando la distancia de separación con el intervalo mencionado hasta llegar a los 120 m. Sin embargo, a esta distancia, si bien la mayoría de los paquetes era captada por el receptor, casi en su totalidad fueron sensados con una potencia inferior a la mínima aceptada por el estándar para garantizar una tasa de error menor al 1 %, por lo que se tomó la marca de los 100 m como distancia efectiva para estas pruebas. La Figura 4.2 muestra de manera gráfica los resultados obtenidos en esta prueba al enviar 500 paquetes a un receptor posicionado a 20 m del transmisor. Gracias a los datos obtenidos fue posible realizar estimaciones de la atenuación de la potencia en transmisión al incrementar la distancia entre

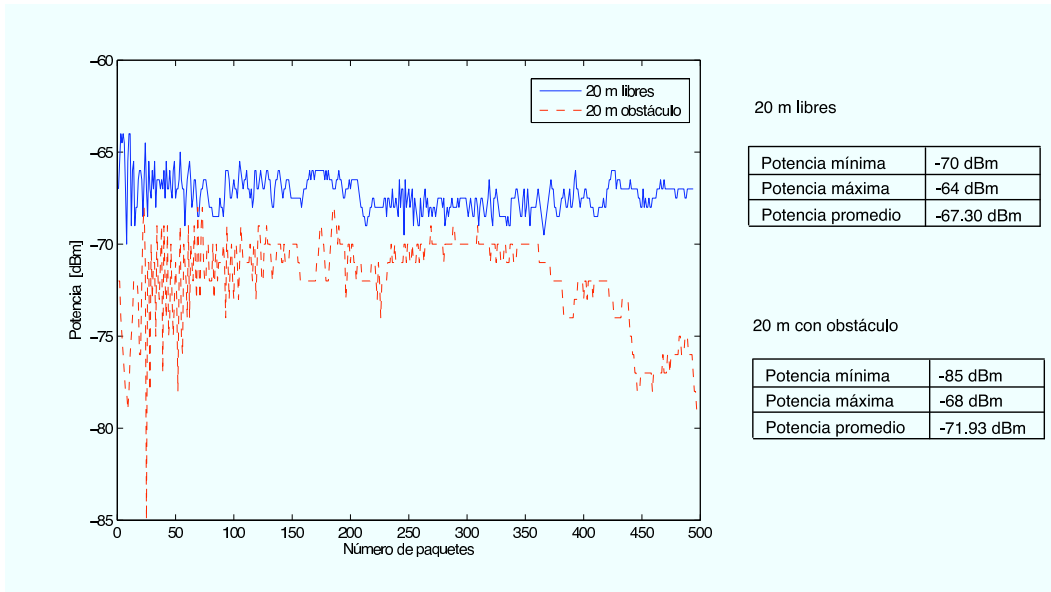


Figura 4.2: Prueba Tx-Rx de 500 paquetes a 20 m

los dos módulos. Tal como se observa, se realizaron dos versiones de la misma prueba. La primera consistió en colocar el transmisor y el receptor en línea de vista y sin obstáculos. Para la segunda versión de esta prueba se colocó un objeto metálico de gran superficie, de tal manera que éste obstaculizara la línea entre el transmisor y el receptor.

Los datos obtenidos revelan que todos los paquetes fueron recibidos con un LQI superior al marcado por el estándar. En promedio se perdieron 3 paquetes a esta distancia. La segunda gráfica muestra el resultado de la prueba con obstáculo. Se observa que el LQI promedio bajó en relación a la prueba sin obstáculo. Aún así, no se presentaron grandes pérdidas de paquetes, sin embargo es notable el cambio en la potencia recibida al presentarse obstáculos en la ruta entre el transmisor y el receptor.

La Figura 4.3 muestra los resultados obtenidos al separar ambos módulos una distancia de 40 m. En la prueba libre de obstáculo se observa un comportamiento de amortiguamiento que abarca aproximadamente los primeros 200 paquetes. En este periodo se presentaron los valores máximos y mínimos registrados. Posteriormente los paquetes presentan un comportamiento en potencia equiparable a la estabilización en la señal de un circuito eléctrico. El resultado de la prueba con

obstáculo es muy drástico. El receptor captó paquetes con un LQI de -95 dBm, la menor potencia sensada a lo largo de todos los experimentos del presente trabajo. Incluso los paquetes con el mayor LQI se acercan al umbral de la potencia promedio presentada en la prueba sin obstáculo.

Al realizar las pruebas a 60 m se observó un comportamiento inesperado. La Figura 4.4 muestra los resultados obtenidos. En la prueba libre de obstáculo se volvió a presentar un efecto similar a la estabilización después de un periodo de amortiguamiento. Al igual que en el caso de 40 m, los primeros paquetes fueron sentidos por el receptor con un LQI muy bajo con cambios abruptos a una potencia mucho mayor. Sin embargo, nuevamente después de un poco más de 200 paquetes, el LQI del resto de la trama calculado por el receptor se estabilizó aproximadamente en -76 dBm, potencia considerada como aceptable por el estándar. Al realizar la prueba con el obstáculo se encontró que el LQI de los paquetes recibidos, si bien no fue constante, osciló dentro de un rango significativamente menor que en la prueba sin obstáculo. No se presentó un efecto de estabilización como en la prueba anterior, pero la potencia promedio sensada por el receptor fue muy similar a la prueba antes mencionada.

Hasta esta distancia, haciendo pruebas de varias maneras, se encontró que los módulos PAN802154 cumplen con las expectativas deseadas, por lo que es posible, una vez realizadas pruebas de adaptación en un escenario final y cuidando el nivel de energía de las baterías, garantizar una comunicación exitosa entre ellos. Al realizar las pruebas en el siguiente rango de distancia, es decir a los 80 m, se presentó un comportamiento no registrado en las pruebas anteriores. La Figura 4.5 muestra los resultados obtenidos a dicha distancia. Se observa que en ambas pruebas la potencia sensada es mucho más baja que en los casos anteriores. De hecho, la potencia máxima alcanzada en estas pruebas está dentro del rango de las potencias mínimas de las pruebas a menor distancia. En la prueba sin obstáculos menos del 10 % de los paquetes fue sentido con una potencia aceptable por el estándar, además de que se presentó una fuerte pérdida de paquetes enviados. Similar es el caso de la prueba con obstáculo, donde, si bien casi la totalidad de los paquetes fueron sentidos con un LQI no aceptable, se presentó una menor pérdida de paquetes y la potencia promedio sensada fue de más del doble que en la prueba anterior.

Tales resultados motivaron la realización de algunas pruebas a esta misma distancia. La primera de estas pruebas secundarias fue modificar en un rango pequeño la distancia entre el transmisor y el emisor, por lo que se realizaron pruebas colocando el receptor a aproximadamente 79.5 m y después a 80.5 m, tal como se muestra en la Figura 4.6. Estas pruebas se realizaron sin obstaculizar la ruta

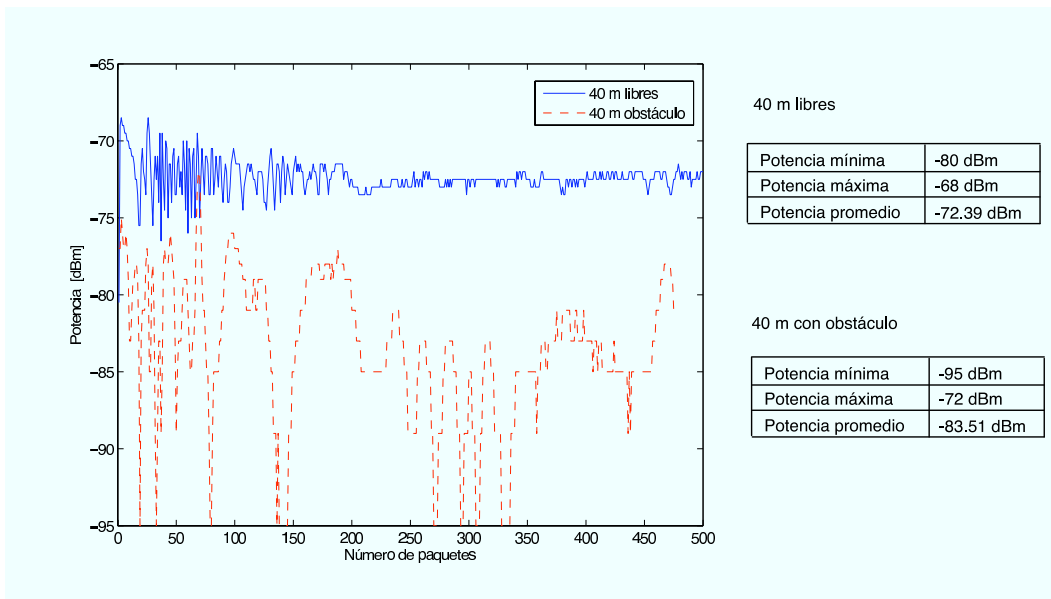


Figura 4.3: Prueba Tx-Rx de 500 paquetes a 40 m

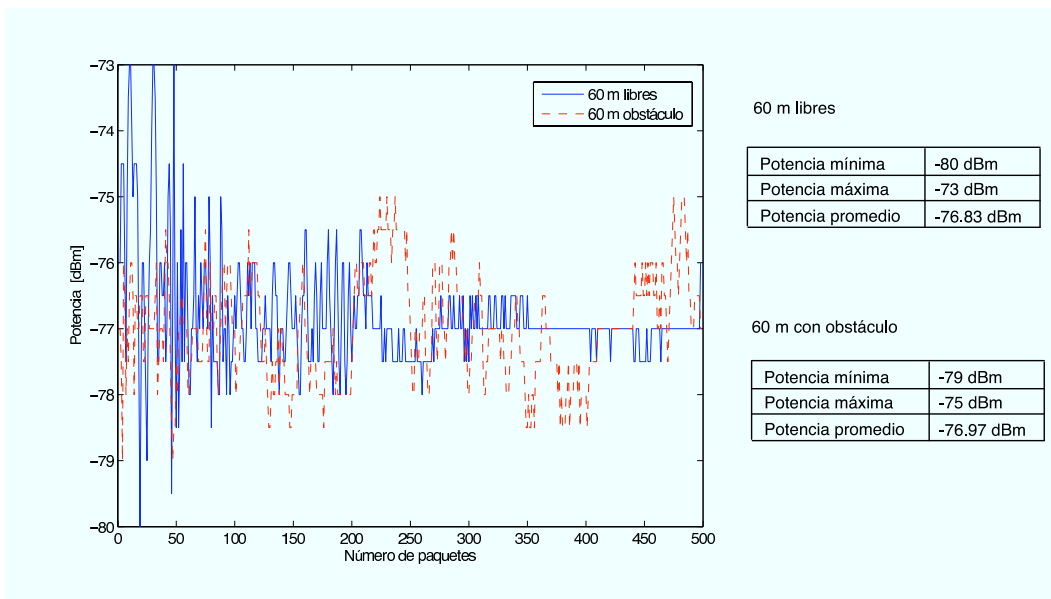


Figura 4.4: Prueba Tx-Rx de 500 paquetes a 60 m

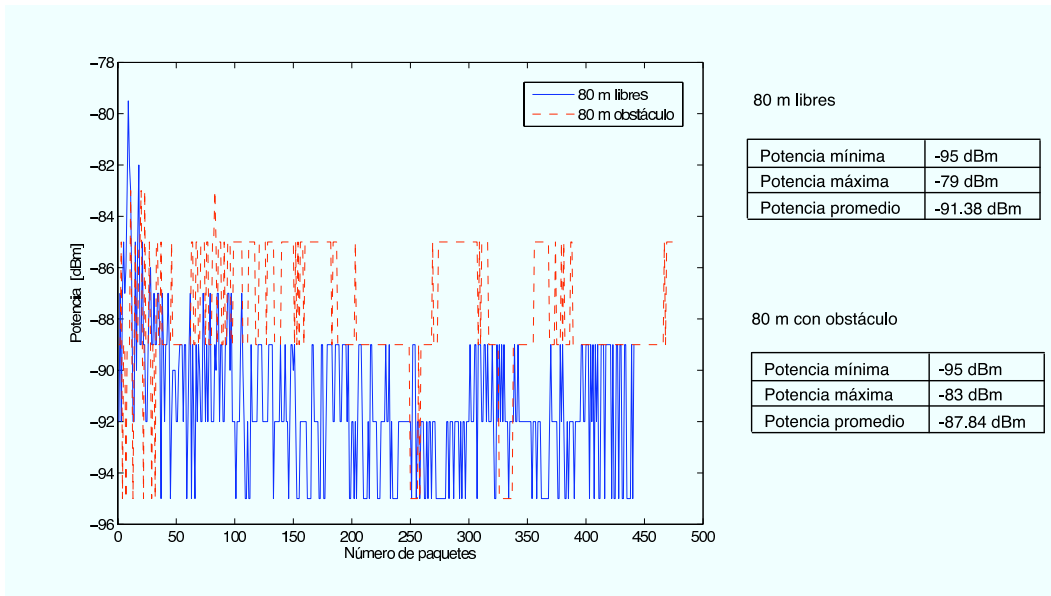


Figura 4.5: Prueba Tx-Rx de 500 paquetes a 80 m

entre los módulos. La Figura 4.7 muestra los resultados obtenidos para cada caso. Se observa que al disminuir aproximadamente medio metro la distancia de separación original los paquetes son captados por el receptor con un LQI superior. Si bien algunos paquetes fueron sentidos debajo del límite marcado por el estándar para 2.4 GHz, la mayoría está por arriba de éste, y la potencia promedio captada fue de -78 dBm, en comparación con los -91 dBm captados en los 80 m libres. los resultados obtenidos al colocar el receptor a aproximadamente 80.5 m del transmisor fueron similares a los obtenidos a los 80 m con obstáculo. Se presentó una gran pérdida de paquetes y la potencia promedio fue más baja que la aceptada. Otra prueba que se realizó fue posicionar el receptor respecto al transmisor como se indica en la Figura 4.8 sin colocar obstáculos. Este reposicionamiento arrojó el mejor resultado dentro de estas pruebas tal como se observa en la Figura 4.9, donde se muestran los resultados obtenidos. Al mover 10 m a la derecha en la marca de 80 m no se obtuvieron grandes mejoras en los resultados. La potencia de los paquetes osciló entre 9 dBm, y la potencia promedio resulto más baja de la requerida para garantizar una comunicación exitosa. Sin embargo, al posicionar el receptor a 10 m a la izquierda de su posición original en la marca de 80 m se obtuvieron resultados sobresalientes. Si bien se presentaron algunos paquetes con

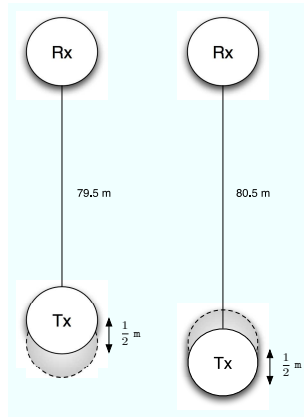


Figura 4.6: Posicionamiento del receptor a 79.5 m y 80.5 m del transmisor

un LQI inferior a -85 dBm, la mayoría de estos fueron sentidos entre -80 y -82 dBm, teniendo una potencia promedio cercana a -82 dBm.

Los resultados obtenidos en estas pruebas secundarias revelaron la existencia de zonas oscuras en las cuales la señal transmitida sufre perturbaciones, posiblemente debido al patrón de radiación de las antenas impresas. También es posible que exista el efecto de multitrayectorias, sin embargo no se profundizó estas suposiciones por estar más allá de los objetivos de este trabajo.

Con los resultados obtenidos en las pruebas previas se determinó que al realizar pruebas con una distancia de separación de 100 m, los paquetes captados serían mínimos y con un LQI muy bajo. La Figura 4.10 muestra los resultados de las pruebas a 100 m libre y con obstáculo. En la prueba libre la potencia promedio sensada por el receptor fue de aproximadamente -81 dBm, muy similar al promedio del mejor caso en la marca de los 80 m. Comparativamente existen casi 10 dBm de diferencia entre la prueba de 80 m y de 100 m libres. Este resultado brinda un fuerte argumento para confirmar que, para estos módulos, existe una zona oscura al rededor de los 80 m. En la prueba con obstáculo se presentó un comportamiento similar, con un LQI promedio cercano a -80 dBm.

Los resultados obtenidos pueden ser reinterpretados de una manera más clara. La Figura 4.11 muestra la relación potencia / distancia obtenida de los resultados en las pruebas libres de obstáculo, siendo muy notoria la caída en potencia sufrida en los 80 m. La Figura 4.12 muestra los resultados obtenidos tomando en cuenta las pruebas secundarias realizadas a los 80 m. Se observa la marcada diferencia entre las 5 mediciones. Los resultados obtenidos a lo largo de estas pruebas re-

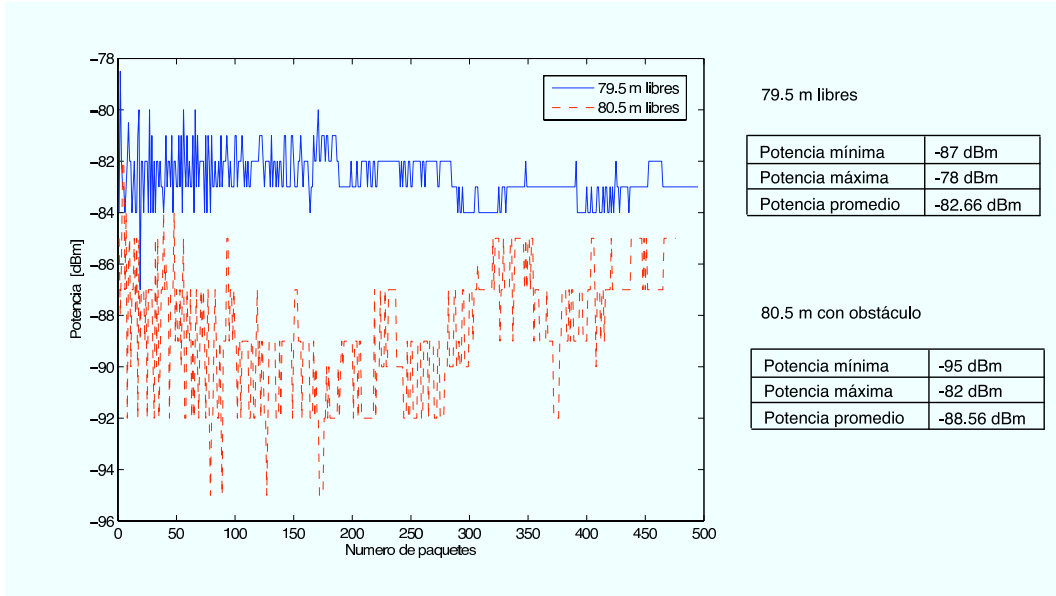


Figura 4.7: Prueba Tx-Rx de 500 paquetes a 79.5 m y 80.5 m

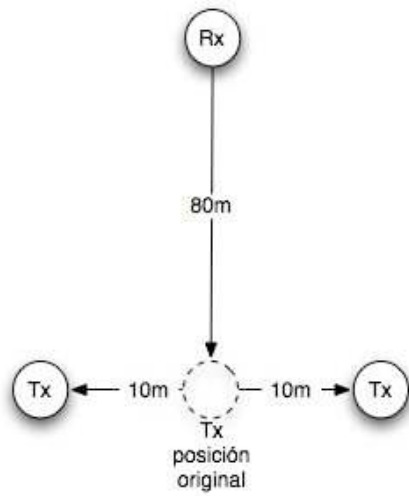


Figura 4.8: Posicionamiento del receptor a 80 m con desviación de 10 m a derecha y a izquierda

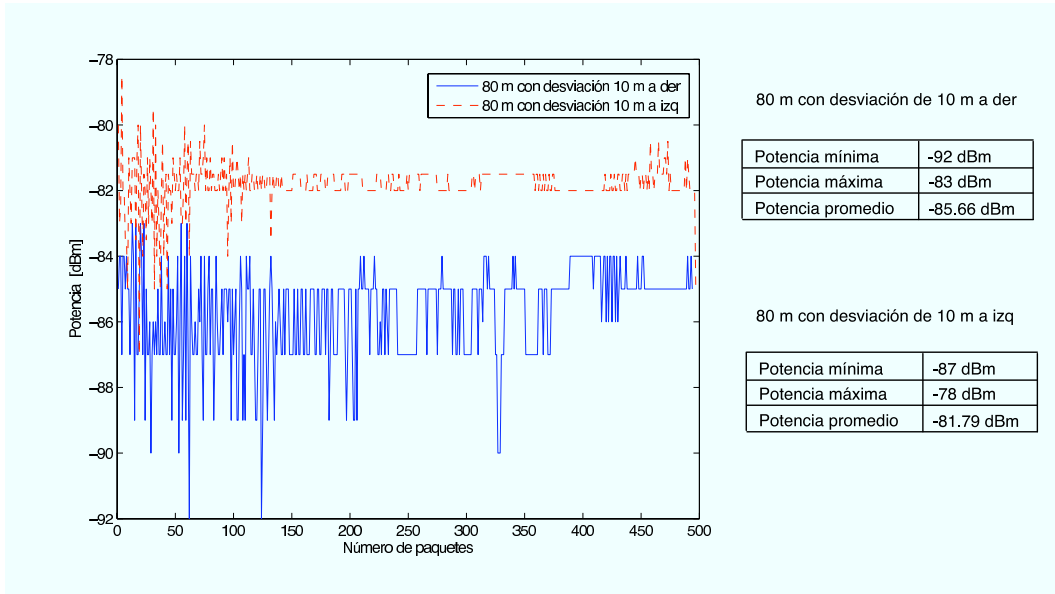


Figura 4.9: Prueba Tx-Rx de 500 paquetes a 80 m con desviación de 10 m a izquierda y a derecha

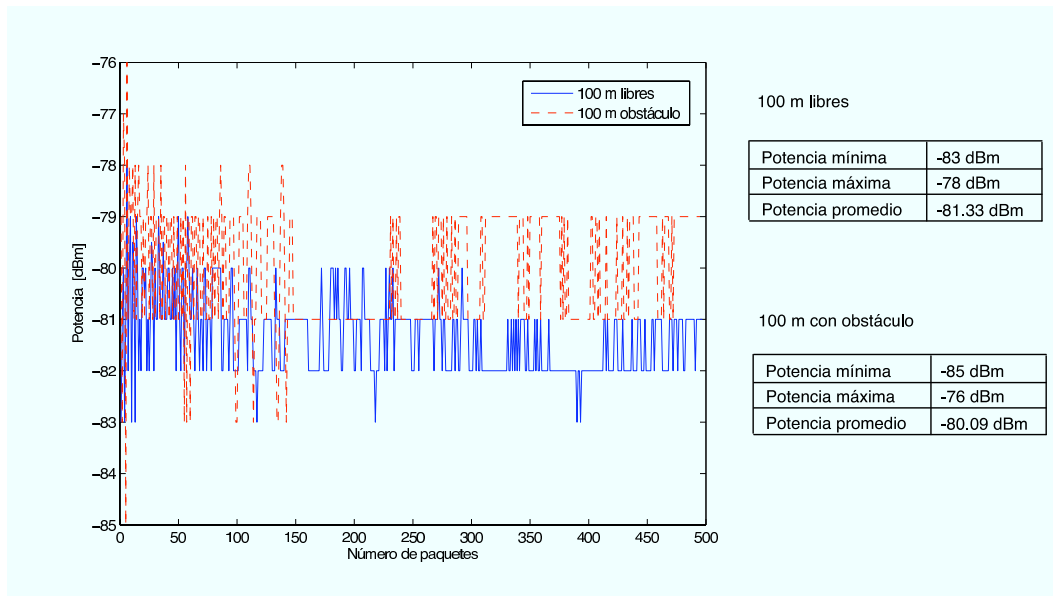


Figura 4.10: Prueba Tx-Rx de 500 paquetes a 100 m

velaron que la atenuación de la potencia de la señal transmitida no presenta un comportamiento lineal ni gradual.

Con el fin de visualizar los datos obtenidos se diseñó un *software* desarrollado en *Matlab*<sup>®</sup> utilizando la aplicación *guide*. El módulo receptor fue conectado a una PC a través del puerto serie, y utilizando la *hyperterminal*, los datos recibidos eran almacenados en un archivo. La función de la interfaz desarrollada fue tomar dichos archivos y desplegar de manera gráfica la potencia de los paquetes que formaban los archivos. Para una mejor comprensión visual la interfaz desplegaba dichas gráficas en 2D y en 3D. También se mostraba en forma de gráfica de barras la cantidad de paquetes perdidos por archivo, junto con resultados numéricos estadísticos importantes, tal como el valor máximo, mínimo y promedio. La figura 4.13 muestra una ventana de dicha interfaz.

Paralelamente a las pruebas antes mencionadas, se realizaron también algunas pruebas básicas para conocer el comportamiento del patrón de radiación de la antena impresa en los módulos. Estas pruebas se llevaron acabo colocando los módulos transmisor y receptor a 50 cm uno de otro. Ambos módulos fueron colocados sobre bases giratorias graduadas. Se procedió enviando 500 paquetes de datos por emisión iniciando con ambos módulos frente a frente. Posteriormente

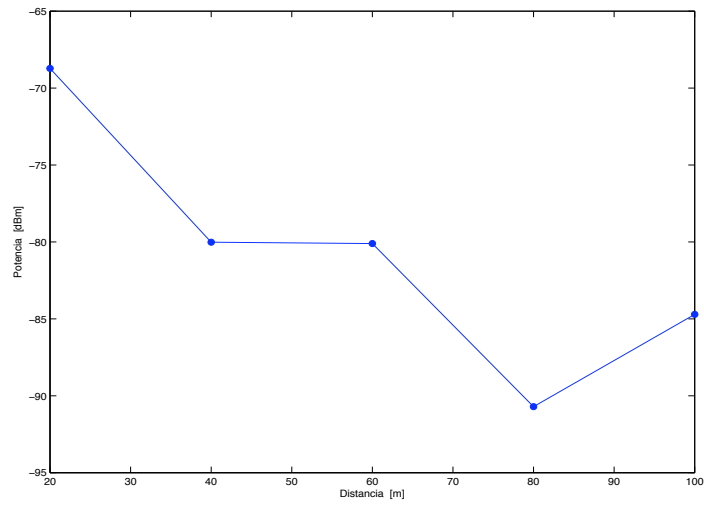


Figura 4.11: *Relación potencia / distancia de los módulos PAN802154 cada 20 m*

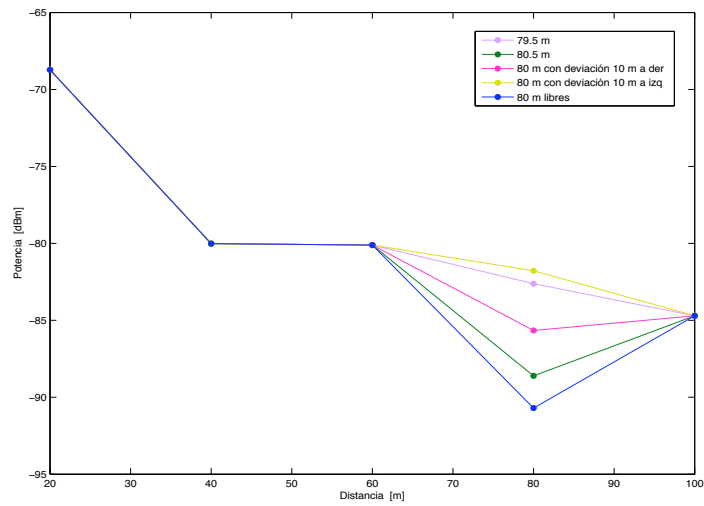


Figura 4.12: *Relación potencia / distancia de los módulos PAN802154 cada 20 m con 5 casos para 80 m*

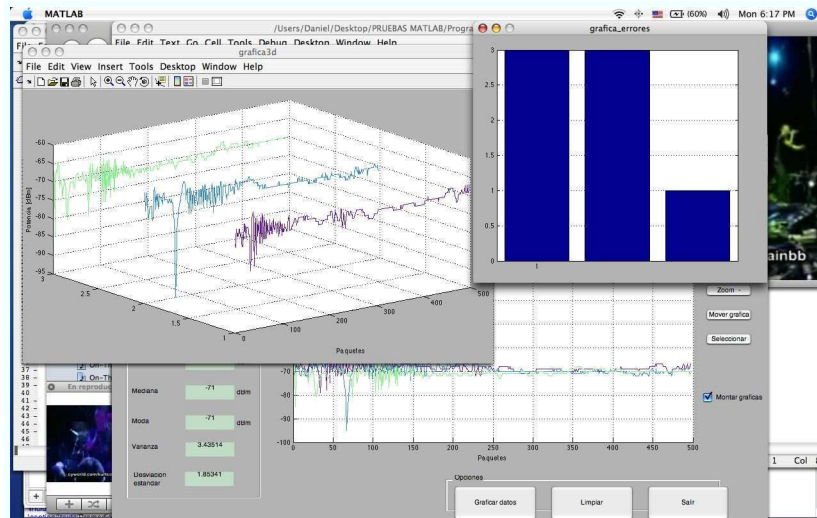


Figura 4.13: Interfaz gráfica desarrollada en Matlab

el receptor fue rotado 20 grados y se realizó una nueva emisión de datos. Se repitió esta prueba hasta llegar a una rotación de 360 grados. Los resultados fueron normalizados y son presentados en la Figura 4.14.

## 4.2. Pruebas asociación de la red

Para realizar pruebas sobre el comportamiento de los nodos y la interacción de estos con la estación base en la red se utilizó la *hyperterminal* de una PC con el fin de desplegar los datos en pantalla. De esta manera fue posible observar el comportamiento de los nodos al asociarse a la red. Cabe recordar que esta no es la interfaz final para el usuario. La Figura 4.15 muestra la pantalla de una de las pruebas realizadas donde la estación base A recibe los datos de una red estrella primaria con 4 nodos. Se observa que al inicializarse la base, ésta se encuentra trabajando en el canal 0. Al prenderse el primer nodo, la estación base le asigna el nombre A1 y manda por el ducto RS-232 el NNU del nodo, los datos de sus sensores (en este caso en código ascii) y la calidad del enlace con que recibe cada paquete. En intervalos diferentes de tiempo se prendieron tres nodos más los cuales la estación base adoptó en la vecindad. El tiempo periodo de muestreo fue de 1 minuto.

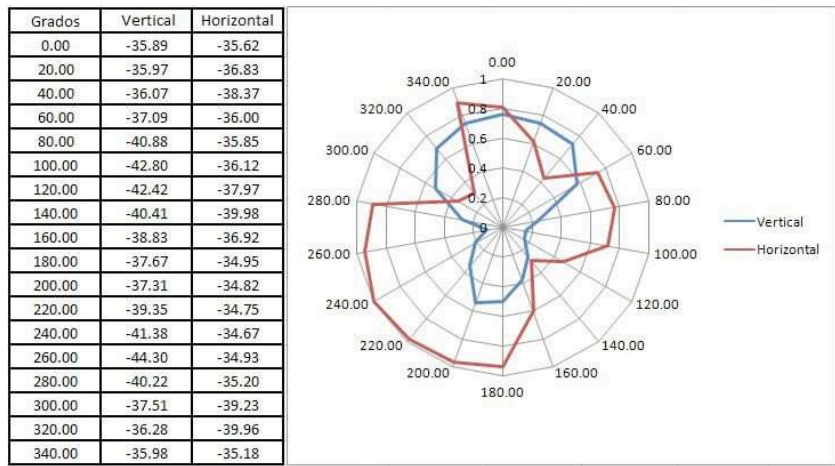


Figura 4.14: Patrón de radiación de la antena impresa en los módulos PAN802154

```

Estacion Base A.
Canal 0

Nuevo nodo A1
Nodo = A1   Lectura = #@   LQI=-56dBm
Nodo = A1   Lectura = #$   LQI=-56dBm
Nodo = A1   Lectura = ##   LQI=-55dBm
Nodo = A1   Lectura = %D   LQI=-54dBm
Nodo = A1   Lectura = #@   LQI=-53dBm
Nodo = A1   Lectura = #!   LQI=-54dBm
Nodo = A1   Lectura = #$   LQI=-54dBm
Nodo = A1   Lectura = %%   LQI=-55dBm
Nodo = A1   Lectura = #^   LQI=-55dBm
Nodo = A1   Lectura = #&   LQI=-53dBm
Nuevo nodo A2
Nodo = A1   Lectura = #!   LQI=-56dBm
Nodo = A2   Lectura = ^!   LQI=-62dBm
Nodo = A1   Lectura = #$   LQI=-55dBm
Nodo = A2   Lectura = ^^   LQI=-64dBm
Nodo = A1   Lectura = #&   LQI=-53dBm
Nodo = A2   Lectura = &&   LQI=-64dBm
Nuevo nodo A3
Nodo = A1   Lectura = *D   LQI=-56dBm
Nodo = A3   Lectura = #@   LQI=-56dBm
Nuevo nodo A4
Nodo = A2   Lectura = ^%   LQI=-66dBm
Nodo = A4   Lectura = #$   LQI=-56dBm
Nodo = A1   Lectura = #$   LQI=-55dBm
Nodo = A3   Lectura = *D   LQI=-54dBm
Nodo = A2   Lectura = &!   LQI=-65dBm
Nodo = A4   Lectura = #^   LQI=-56dBm

```

Figura 4.15: *Porción de pantalla hyperterminal de una red estrella primaria A formada por una estación base y cuatro nodos*

# Capítulo 5

## Conclusiones

### 5.1. Conclusiones

En este trabajo se presenta el diseño e implementación de una red de sensores inalámbrica económica, de baja velocidad y bajo consumo de potencia con el fin de monitorear variables medioambientales tales como temperatura y humedad relativa para aplicaciones agrícolas. Una vez diseñada la red se realizaron pruebas para conocer las capacidades de transmisión de los módulos utilizados. En base a una red de topología estrella con un radio de operación aproximado de 70 m se logró expandir el alcance de ésta creando una red jerárquica de dos niveles o red de redes estrellas. Se utilizó una topología tipo árbol, de tal manera que se crearon vecindades formadas por múltiples nodos y una estación base, donde cada una de las vecindades cubren un área similar a la antes mencionada. Cada estación base responde a un coordinador general de la red, el cual a su vez se encuentra comunicado con una PC via RS-232 para desplegar los datos obtenidos a través de una interfaz gráfica amigable al usuario. La comunicación utiliza un método de acceso al medio sencillo basado en el estándar IEEE802.15.4 a través del protocolo propietario SMAC de *Freescale*<sup>®</sup>, ya que las funciones que este provee son suficientes para el desarrollo de la aplicación. Se optimizó el funcionamiento de nodos, bases y coordinador, logrando de esta manera el diseño de una red inalámbrica que cumple con las expectativas esperadas.

### 5.2. Aportaciones

Entre las aportaciones realizadas con este trabajo destacan las siguientes:

- La caracterización de los módulos en un entorno real
- El diseño y desarrollo de protocolo en la capa de aplicación para una red funcional con topología estrella
- El diseño y desarrollo en la capa de aplicación para una red jerárquica de dos niveles en etapa básica
- Al ser uno de los primeros trabajos sobre esta área con este tipo de módulos en nuestra institución, se sentaron bases para futuros trabajos sobre el área

Cabe mencionar que los resultados de este trabajo de tesis brindaron información la cual fue expuesta en un congreso nacional de ingeniería electrónica y en un congreso internacional de comunicaciones en Colombia avalado por IEEE.

### **5.3. Trabajo futuro**

- Estudio de multitrayectorias y zonas oscuras
- Optimización
- Cálculos de tiempos de latencia
- Estudio de las posibilidades de máxima ampliación de la red
- Caracterización de antenas externas con el fin de lograr una mayor cobertura

# Apéndice A

## Características de las ondas electromagnéticas

El objetivo de un sistema electrónico de comunicaciones es transferir información entre dos o más lugares. La información, ya sea analógica o digital debe de ser transformada a energía electromagnética con el fin de ser transmitida a través de un medio. Una onda electromagnética está formada por una combinación de campos eléctricos y magnéticos oscilantes que se propagan a través del espacio transportando energía de un lugar a otro, y es producida por la aceleración de una carga eléctrica. Las características que definen a una onda electromagnética son:

- Amplitud: Constituye el valor máximo que puede alcanzar la cresta o pico de una onda. El punto de valor mínimo recibe el nombre de valle o vientre
- Frecuencia: Es la cantidad de oscilaciones por segundo de una onda
- Longitud de onda: Representa la distancia de un ciclo en el espacio, es decir, la distancia entre dos puntos máximos o mínimos de una onda electromagnética. La longitud de onda está relacionada con la frecuencia de la siguiente manera:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

donde

$\lambda$  = longitud de onda [m]

$c$  = velocidad de la luz [ $3 \times 10^8$  m/s]

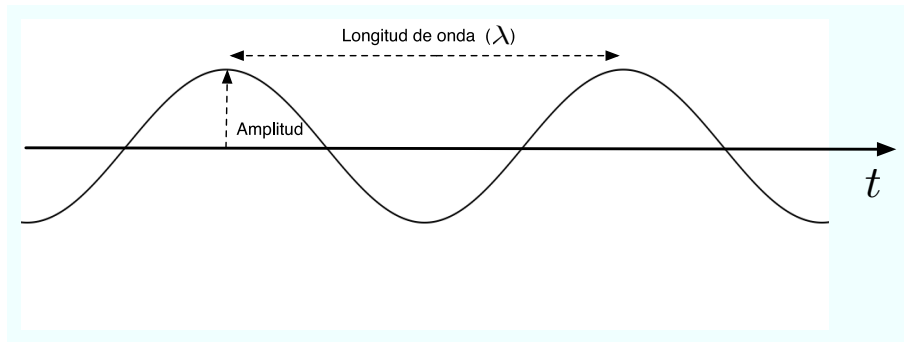


Figura A.1: Representación de una onda senoidal desplazándose en el tiempo

$f$  = frecuencia [Hz]

La Figura A.1 muestra un ejemplo gráfico de una onda electromagnética. Otros conceptos que influyen en el comportamiento de la prolagación de ondas electromagnéticas son:

- Frente de onda: Representa una superficie de ondas electromagnéticas de fase constante
- Densidad de potencia: Es la rapidez con la que la energía logra atravesar una superficie en el espacio libre
- Intensidad de campo: Se le llama así a la intensidad de los campos, tanto eléctrico como magnético, de una onda electromagnética que se propaga en el espacio libre. La relación entre la densidad de potencia y la intensidad de campo ambos parámetros se observa en la siguiente ecuación:

$$\mathcal{P} = \mathcal{E} \mathcal{H}$$

donde

$\mathcal{P}$  = Densidad de potencia [watts / metro cuadrado]

$\mathcal{E}$  = Intensidad rms del campo eléctrico [volts / metro]

$\mathcal{H}$  = Intensidad rms del campo magnético [amperes / metro]

Se le llama radiador isotrópico a una fuente puntual que irradia potencia a una tasa

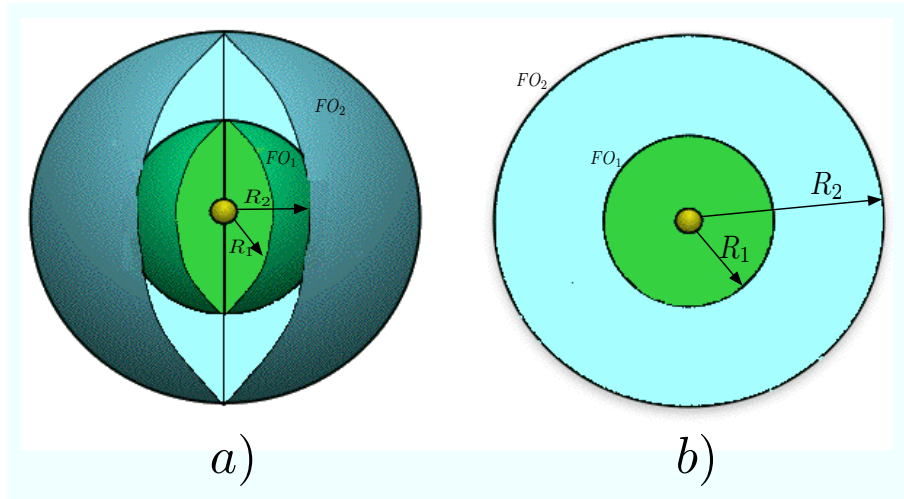


Figura A.2: Frente de onda de un radiador isotrópico. a) Diagrama en 3 dimensiones. b) Diagrama en 2 dimensiones

constante y uniformemente en todas direcciones [33] el cual produce un frente de onda esférico con un radio  $R$ . Teniendo en cuenta estas características es posible representar el campo de radiación esférico tal como el mostrado en la Figura A.2 donde  $R_1$  es el radio y  $FO_1$  el frente de onda. Todos los puntos a la distancia  $R$  de la fuente tienen la misma densidad de potencia. La potencia en cualquier punto de la esfera se define como

$$\mathcal{P} = \frac{P_{rad}}{4\pi R_n^2}$$

donde

$P_{rad}$  = potencia total irradiada [watts]

$R_n$  = radio de la esfera ( $R_1$  o  $R_2$  o cualquier otro)

$4\pi R_n^2$  = área de la esfera

En realidad no existe un radiador realmente isotrópico, lo más cercano a éste es una antena omnidireccional.

Las propiedades ópticas presentes en las ondas electromagnéticas son:

- Refracción: Esta propiedad óptica se presenta cuando una onda de radio pasa de un medio a otro de distinta densidad. Este cambio de dirección

está originado por la distinta velocidad de la luz en cada medio

- **Reflexión:** Se presenta cuando una onda incidente choca con una frontera entre dos medios, y algo o toda la potencia incidente no entra en el segundo material, sino que es reflejada. Cuando existe una reflexión total de la onda, el ángulo de reflexión será igual al ángulo de incidencia. Cuando la superficie reflectora es curva, la curvatura de la onda reflejada es distinta a la de la onda incidente. Se pueden producir efectos de reflexión cuando la superficie reflectora es irregular o áspera. Existen tres tipos de reflexiones: la difusa, donde al producirse el choque el frente de onda se dispersa al azar en muchas direcciones. La especular ocurre cuando la superficie reflectora es lisa. Finalmente, cuando la superficie es semiáspera se produce una mezcla de reflexión difusa y especular
- **Difracción:** Es la redistribución de energía dentro de un frente de onda al pasar cerca de la orilla de algún objeto intrusivo en la trayectoria de la onda. Es un fenómeno de tipo interferencial, es decir, que modifica o destruye una señal durante su trayecto entre el emisor y el receptor
- **Interferencia:** Esta se produce siempre que dos o más ondas electromagnéticas se combinan, esto es que ocupan un mismo punto del espacio en forma simultánea, degradando de ésta manera el funcionamiento del sistema

## **A.1. Espectro electromagnético**

La oscilación o la aceleración de una carga eléctrica cualquiera genera un fenómeno físico integrado por componentes eléctricos y magnéticos, conocido como espectro de radiación de ondas electromagnéticas. Este espectro, conocido como espectro electromagnético, se puede ordenar a partir de ondas que poseen frecuencias muy bajas de pocos hertz (Hz) o ciclos por segundo con longitudes muy largas, hasta llegar a ondas de frecuencias muy altas, de miles de millones de hertz o ciclos por segundo con longitudes extremadamente cortas. La tabla A.1 muestra los diferentes rangos frecuenciales en telecomunicaciones.

## **A.2. Banda ISM**

Este es un conjunto de bandas reservadas internacionalmente para uso no comercial de radiofrecuencia electromagnética en áreas industrial, científica y médi-

<b>Nombre</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Longitud de onda</b>
Extrema baja frecuencia (ELF)	3-30 Hz	100,000-10,000km
Super baja frecuencia (SLF)	30-300 Hz	10,000-1000 Km
Ultra baja frecuencia (ULF)	300-3000 Hz	1000-100 Km
Muy baja frecuencia (VLF)	3-30 KHz	100-10 Km
Baja frecuencia (LF)	30-300 KHz	10-1 KM
Mediana frecuencia (MF)	300-3000 KHz	1 Km-100 m
Alta frecuencia (HF)	3-30 MKz	100-10m
Muy alta frecuencia (VHF)	30-300 MHz	10-1 m
Ultra alta frecuencia (UHF)	300-3000 MHz	1m-100 mm
Super alta frecuencia (UHF)	3-30 GHz	100 mm-10 mm
Extrema alta frecuencia (UHF)	30-300 GHz	10 mm-1 mm

Cuadro A.1: *Relación de canales de radiofrecuencia aprobados por la ITU*

ca. Fueron definidas por la unión internacional de telecomunicaciones (ITU) [14] en el artículo 5 de las Regulaciones Radio (RR), concretamente puntos 5.138 y 5.150. El uso de estas bandas de frecuencia está abierto a todo el mundo sin necesidad de licencia, respetando las regulaciones que limitan los niveles de potencia transmitida. Este hecho fuerza a que este tipo de comunicaciones tengan cierta tolerancia frente a errores y que utilicen mecanismos de protección contra interferencias, como técnicas de ensanchado de espectro. Por este motivo, las redes que funcionan en esta banda se les denomina redes de espectro ensanchado.

### **A.3. Modulación**

La modulación se refiere al proceso de convertir una señal de información en una forma conveniente para su transmisión utilizando otra señal. Ésto se logra sobreponiendo la señal de información en la señal portadora. La señal superpuesta representa la información que será transmitida [12]. En comunicaciones inalámbricas es necesario montar la señal de información sobre una señal ya conocida tanto para el quien transmite la información como para quien la recibe. Esta señal es conocida como señal portadora, y es la encargada de transportar la señal de información a través de un sistema. La señal de información modula o manipula a la señal portadora modificando ya sea su amplitud, su frecuencia o su fase. La siguiente ecuación representa una onda senoidal

$$v(n) = V \text{sen}(2\pi f n + \theta)$$

donde

$v(n)$  = señal senoidal digital variable

$V$  = amplitud máxima

$f$  = frecuencia (hertz)

$\theta$  = desplazamiento de fase (radianes)

Si la amplitud de la portadora es variada en relación a la señal de información se produce una modulación tipo ASK (Amplitude Shift Keying). Si la frecuencia es modificada en proporcionalmente respecto a la señal de información se produce una modulación tipo FSK (Frequency Shift Keying). De la misma manera, al modificar la fase de la portadora proporcionalmente a la señal de información se produce una modulación PSK (Phase Shift Keying). Por último, si se varían tanto la amplitud como la fase de la portadora respecto a la señal de información se produce una modulación tipo QAM (Quadrature Amplitude Modulation).

Algunas de las ventajas de la modulación son:

- Facilita la propagación de la señal de información por el medio de comunicación
- En comunicaciones inalámbricas, disminuye dimensiones de antenas
- Optimiza el ancho de banda de cada canal
- Evita interferencia entre canales
- Protege a la información de las degradaciones por ruido.
- Facilita la radiación de la señal, y por lo tanto la disminución de la longitud de antenas al transmitir ondas de baja frecuencia sobre una portadora de alta frecuencia

## **A.4. Modulación por desplazamiento cuaternario de fase compensada**

Como ya se ha comentado, la modulación por desplazamiento de fase es una forma de modulación digital angular de amplitud constante. La PSK mas sencilla

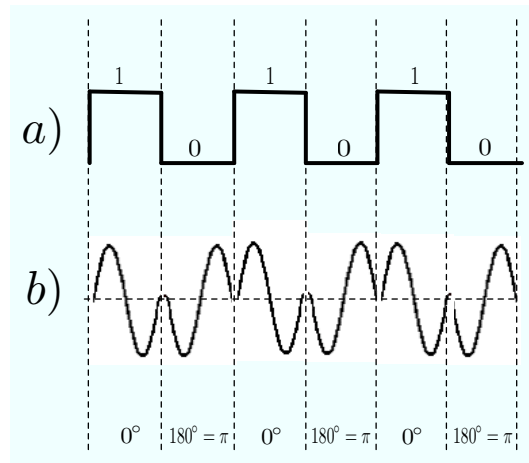


Figura A.3: Modulación BPSK para una onda cuadrada. a) Entrada binaria. b) Salida BPSK.

es la BPSK (Binary Phase Shift Keying) donde una frecuencia portadora puede generar dos posibles fases de salida. Estas fases representan un 0 o 1 lógico. La fase de la portadora de salida variará entre dos ángulos desfasados 180 al cambiar de estado la señal de información de entrada.

La Figura A.3 muestra la salida BPSK a una entrada binaria. Se observa que este tipo de modulación codifica cada bit individualmente, dando como salida dos condiciones posibles. En la modulación por desplazamiento cuaternario de fase o QPSK (Quaternary Phase Shift Keying) los datos binarios de entrada se forman por grupos de dos bits cada uno llamados dibits. De esta manera, existen cuatro posibles entradas al modulador: 00, 01, 10 y 11. Al entrar cada dibit al modulador, un bit entra en el canal I (In Phase) mientras que el segundo bit entra en el canal Q (Quadrature). Como su nombre lo indica, el canal I está en fase, mientras que el canal Q está desfasado  $90^\circ$  respecto a la portadora de referencia. La Figura A.4 muestra el diagrama a bloques resumido del modulador QPSK. Como se observa, existen cuatro estados de salida para cuatro estados de entrada.

Una variante la modulación QPSK es la QPSK compensada, mejor conocida como O-QPSK (Offset Quaternary Phase Shift Keying). En ésta la forma de onda de bits en los canales I y Q tienen un corrimiento en fase entre si en la mitad de un tiempo de bit. Una ventaja de la modulación O-QPSK es el desplazamiento limitado de fase que se debe impartir durante la modulación.

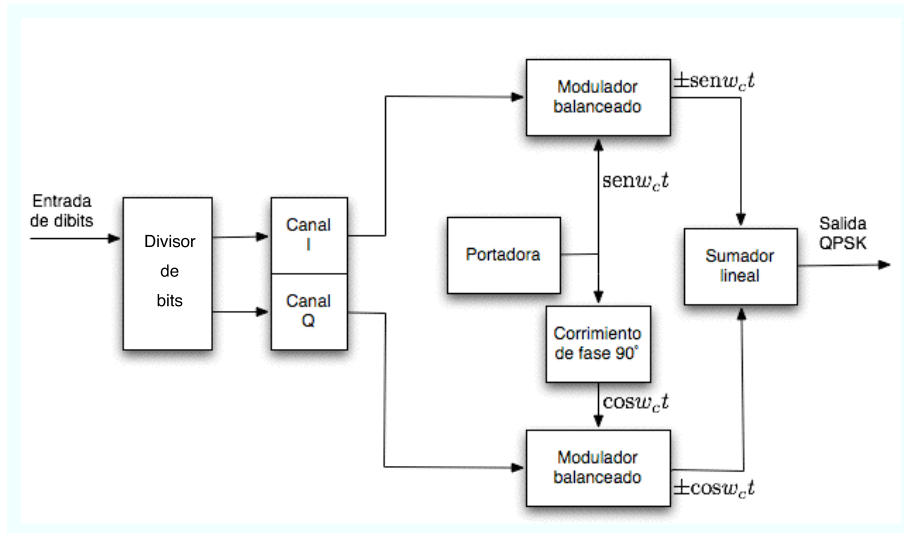


Figura A.4: Diagrama a bloques simplificado del modulador QPSK

Canal Q	Canal I	Sumador lineal	Fase de salida QPSK
0	0	$-1\cos w_c t - 1\sen w_c t$	$-135^\circ$
0	1	$-1\cos w_c t - 1\sen w_c t$	$-45^\circ$
1	0	$-1\cos w_c t - 1\sen w_c t$	$135^\circ$
1	1	$-1\cos w_c t - 1\sen w_c t$	$45^\circ$

Cuadro A.2: Relación de salidas QPSK respecto a las posibles entradas

# Apéndice B

## Primitivas SMAC

SMAC ofrece al programador 30 funciones o primitivas, con las cuales es posible programar y controlar de manera sencilla algunas funciones básicas del microcontrolador y de algunos periféricos, tales como displays de cristal líquido, el módulo de interfaz de comunicación serial, LED'S y los módulos de seguridad y de programación a través del aire (OTAP, acrónimo del inglés Over-The-Air-Programming). A continuación se describe cada una de las primitivas [29].

**MCPSDataRequest():** Envía un paquete. Los datos a enviar son cargados en un registro predeterminado, se llama a esta función y los datos son enviados. Este comando pone al microcontrolador en estado de espera hasta que el radio termine de transmitir el paquete, por lo que la aplicación del usuario es detenida hasta que le proceso de transmisión es finalizado.

**MCPSDataIndication():** Esta función está localizada entre el código de aplicación del usuario y es requerida por SMAC. Esto permite llamar a esta función cuando un dato es recibido por el radio para ser procesado por la aplicación. Al recibir un paquete, automáticamente el *software* se dirige a esta primitiva, la cual permite entrar a la sección de toma de decisiones.

**MLMEHibernateRequest():** Pone al radio en modo de hibernación. Cuando el radio se encuentra en este estado la salida de reloj (CLKO) es deshabilitada. Si el microcontrolador utiliza esta señal como fuente de reloj, el usuario debe primero cambiar de fuente al reloj interno del microcontrolador y después utilizar esta primitiva para poner el radio en estado de hibernación.

**MLMEWakeRequest():** Pone en funcionamiento el radio cuando éste se encuentra en modo de bajo consumo. Esta primitiva es llamada directamente

Valor	Frecuencia	Valor	Frecuencia
0	16 MHz*	4	1 MHz
1	8 MHz	5	62.5 kHz
2	4 MHz	6	32.78 kHz
3	2 MHz	7	16.393 kHz

Cuadro B.1: *Relación de valor-frecuencia de reloj para la primitiva MLME-SetMC13192ClockRate(), donde \* = frecuencia recomendada y preestablecida*

cuando el radio se encuentra en estado de hibernación o en estado Doze y requiere ser activado.

**MLMESetChannelReques():** Selecciona la frecuencia del canal de trabajo. La Tabla 3.1 en el Capítulo 3 muestra la relación canal-frecuencia.

**MLMERXEnableRequest():** Pone al radio en modo de recepción en el canal seleccionado por MLMESetChannelRequest(). De esta manera el radio se encuentra activado para recibir paquetes enviados desde otro módulo.

**MLMERXDisableRequest():** Regresa al radio al estado ocioso desde el estado de recepción. Esta primitiva puede ser utilizada para apagar el receptor después de que un paquete válido es recibido o cuando caduca un tiempo de recepción específico.

**MLMESetMC13192ClockRate():** Configura la frecuencia de reloj del radio o transreceptor. La Tabla B.1 muestra el indicador necesario para cada frecuencia.

**MLMEEnergyDetect():** Esta función inicia un ciclo de detección de energía (ED) / evaluación de limpieza de canal (CCA). El argumento regresado debe ser interpretado como  $(-\frac{\text{argumento}}{2})$ .

**MLMEMC13192SoftReset:** Esta función realiza un reinicio suave al radio. Cuando esta función es llamada, la indicación de reinicio debe de ser enviada a la aplicación a través de la primitiva MLMEC13192ResetIndicarion().

**MLMEM13192XtalAdjust():** Se utiliza para ajustar la señal de referencia de reloj del radio por un valor de corte.

Valor	Frecuencia	Valor	Frecuencia
0	2 MHz	4	125 kHz
1	1 MHz	5	62.5 kHz
2	500 kHz	6	31.25 kHz
3	250 kHz*	7	15.625 kHz

Cuadro B.2: *Relación de valor-frecuencia de reloj para la primitiva MLME-SetMC13192TmrPrescale(), donde \* = frecuencia recomendada y preestablecida*

**MLMELinkQuality():** Esta función regresa un valor entero el cual representa la calidad de enlace de el último paquete recibido. La lectura es en dBm y debe de ser leído como

$$\text{dBm} = \left( \frac{\text{Enlace de calidad}}{2} \right)$$

El valor de la calidad de enlace de un paquete es valido y preservado hasta recibir uno nuevo.

**MLMSEtMC13192TmrPrescale** Configura la tasa a la cual los temporizadores radio operan. La Tabla B.2 muestra el indicador necesario para realizar la configuración a las diferentes frecuencias disponibles.

**MLMEMC13192FEGainAdjust():** Compensador de energía de detección.

**MLMEDozeRequest():** Permite al usuario poner el radio en modo Doze (sin CLKO pero con un despertar automático) o modo Acoma (con CLKO pero sin despertar automático). Para activar el estado Acoma es necesario llamar esta función con el parámetro 0. Para activar el estado Doze se debe utilizar esta función con el tiempo de despertar automático como parámetro.

**MLMEMC13192PAOutputAdjust():** Realiza el ajuste de potencia de salida en la transmisión. La Tabla B.3 muestra el argumento en valor binario para la potencia de transmisión deseada.

**MLMEGetRficVersion():** Esta función lee el número de versión del radio.

Valor en binario	Potencia de salida [dBm]	Valor en binario	Potencia de salida [dBm]
0000	-16.6	1000	-1.0
0001	-16	1001	-0.5
0010	-15.3	1010	0.0
0011	-14.8	1011	0.4
0100	-8.8	1100	2.1
0101	-8.1	1101	2.8
0110	-7.5	1110	3.5
0111	-6.9	1111	3.6

Cuadro B.3: *Relación de código-potencia de salida de transmisión para la primitiva MLMEMC13192PAOutputAdjust()*

**MLMETestMode():** Empleando esta función, el usuario puede realizar pruebas al radio. Algunos modos básicos de prueba son necesarios para asistir a los usuarios de SMAC con el fin de evaluar el *hardware*. Los modos de prueba implementados son los siguientes:

- Modo PRBS9: repetidamente envía un paquete de 64 bytes desde el algoritmo de secuencia binaria pseudoaleatoria de noveno orden PRBS9. Todos los paquetes transmitidos en este modo son idénticos
- force\_idle: pone el radio de regreso en modo ocioso
- Rx continuo: pone el radio en modo de recepción y permite al desarrollador observar cuestiones espectrales relacionadas con la sección de recepción del radio. Este modo también puede ser utilizado para medir la estática de recepción del radio
- Tx continuo sin modulación: configura el dispositivo para transmitir continuamente en una onda no modulada y permite caracterizar la potencia de transmisión
- Tx continuo con modulación: configura el dispositivo para transmitir un patrón 10101010 continuo

**MLMEMC13192ResetIndication():** Al igual que la primitiva MCPSPDataIndication(), ésta forma parte del código básico. Esto permite a SMAC llamar a esta función cuando un reinicio suave (SoftReset) ocurre.

**MCUInit():** Inicializa el microcontrolador para la comunicación con el transreceptor.

**UseExternalClock():** Configura el microcontrolador para correr utilizando un reloj externo. En todas las tarjetas de *Freescale*<sup>®</sup> el reloj externo es conectado a la señal CLKO del transreceptor. Para configurar la señal CLKO externa se utiliza la primitiva. `MLMSetMC13192ClockRate()`.

**UseMCUClock():** Configura el microcontrolador para correr utilizando el reloj interno. Esta función es por lo general utilizada antes de poner el transreceptor en modo de bajo consumo.

**MLMScanRequest():** Esta función escanea los diferentes canales utilizando, ya sea ED o CCA, y regresa la cantidad de energía de todos los canales.

**MC13192DisableInterrupts():** Deshabilita las interrupciones que son utilizadas por SMAC.

**MC13192EnableInterrupts():** Habilita las interrupciones que son utilizadas por SMAC.

**MC13192ContReset():** Esta función apaga el transreceptor, mandandolo al modo de más bajo consumo.

**MC13192Restart():** Es la contraparte de la primitiva anterior. Sirve para prender el transreceptor.

**SECSetKey():** Establece una llave interna para ser utilizada en un mecanismo de encriptación-desencriptación.

**SECSecure():** Esta primitiva encripta-decripta simétricamente el buffer utilizando la llave previamente definida. Los datos encriptados son sobrescritos en el buffer original.

**OTAPActivate():** Esta función permite acceder al módulo de programación sobre el aire OTAP.

# Apéndice C

## Acrónimos

**ACK:** Acknowledge

**ADC:** Analog to digital converter

**BFSK:** Binary frequency shift keying

**BPSK:** Binary phase shift keying

**CCA:** Clear channel assessment

**CDMA:** Code division multiple access

**CIU:** Código de identificación único

**CRC:** Cyclic redundancy check

**CSMA-CA:** Carrier sense multiple access with collision avoidance

**DARPA:** Defense Advanced Research Projects Agency

**ED:** Energy detect

**FCS:** Frame check sequence

**FFD:** Full function device

**FLI:** Frame length indicator

**FSK:** Frequency shift keying

**IEEE:** Institute of Electrical and Electronics Engineer

**ISM:** Industrial, scientific, medical band

**ISO:** International Organization for Standardization

**ITU:** International Telecommunication Union

**LLC:** Logical link control

**LQI:** Link quality

**LR-WPAN:** Low rate wireless personal area network

**MAC:** Medium access control

**NNU:** Nombre de nodo único

**O-QPSK:** Offset quadrature phase shift keying

**OSI:** Open system interconnection

**PAN:** Personal area network

**PC:** Personal computer

**PTA2:** Puerto A bit 2

**PTD0:** Puerto D bit 0

**PHY:** Capa física

**QPSK:** Quadrature phase shift keying

**RF:** Radiofrecuencia

**RFD:** Reduced function device

**RR:** Regulaciones radio

**SARD:** Sensor applications reference design

**SFD:** Start of frame delimiter

**SMAC:** Simple medium access control

**SS:** Spread Spectrum

**WPAN:** Wireless personal area network

# Bibliografía

- [1] Applications: World's largest internet enabled, wireless mesh sensor network for agriculture.
- [2] L. Roshak A. Asnussen, R. Rodriguez. Mc1319x range performance. Technical report, Freescale Semiconductor, 2005.
- [3] José Pelegrí Sebastiá Abraham Menéndez Márquez, Juan José Pérez Solano. Red de sensores inalámbricos para monitorización de terrenos mediante tecnología ieee 802.15.4.
- [4] A. Mainwaring J. Polastre R. Szewczyk D. Culler J. Anderson. Wireless sensor networks for habitat monitoring. *WSNA'02*, 2002.
- [5] Aline Baggio. Wireless sensor networks in precision agriculture. *Workshop on Real-World Wireless Sensor Networks*, 2005.
- [6] Carlos Iván Estrella Balderrama. Reprogramación dinámica de redes inalámbricas de sensores. 2006.
- [7] Daniel E. Amador Bartolini. Medición de humedad en el suelo utilizando fibra óptica de plástico. Master's thesis, Universidad Autónoma de Baja California, 2008.
- [8] Glosario Bluetooth. <http://spanish.bluetooth.com/bluetooth/technology/glossary/>.
- [9] Ian F. Akyildiz Weilian Su Yogesh Sankarasubramaniam Erdal Cayirci. A survey on sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, pages 102–114, 2002.
- [10] Lionel Sacks Chibuzor Edordu. self organising wireless sensor networks as a land management tool in developing countries: A preliminary survey. *London Communications Symposium*, 2006.

- [11] DARPA. <http://www.darpa.mil/>.
- [12] Werner Feibel. *Encyclopedia of Networking*. London Road Design, 1996.
- [13] <http://www.ambient systems.net/ambient/index.htm>. Ambient systems.
- [14] ITU. <http://www.itu.int/net/home/index.aspx>.
- [15] R. Beckwith J. Burrell, T. Brooke. Vineyard computing: sensor networks in agricultural production. *Pervasive Computing, IEEE.*, 3(1):38–45, Enero-Marzo 2004.
- [16] K.G. Langendoen, A. Baggio, and O.W. Visser. Murphy loves potatoes: Experiences from a pilot sensor network deployment in precision agriculture. *14th Int. Workshop on Parallel and Distributed Real-Time Systems (WPDRTS)*, 2006.
- [17] G. Werner-Allen K. Lorincz O. Marcillo J. Johnson M. Ruiz J. Lees. Deploying a wireless sensor network on an active volcano. *IEEE Internet Computing*, pages 18–25, 2006.
- [18] LOFAR-agro. <http://www.lofar.org/p/agriculture.htm>.
- [19] R. Marcelín Jiménez M. López Villaseñor, M. A. Gutiérrez Galindo. De sensores inalámbricos, mitigación de riesgos y sistemas autoorganizados. *Revista Contactos*, 2007.
- [20] Jordi Mayné. *IEEE 802.15.4 y Zigbee*.
- [21] Khaled Arisha Mohamed Younis, Moustafa Youssef. Energy-aware routing in cluster-based sensor networks. In *10th IEEE Int'l Symp. on modeling, analysis and simulation of computer and telecommunications systems*, 2002.
- [22] Mariam M. Al-Otaibi Mostafa I. Abd-El-Barr, Mohamen A. M. Youssef. Wireless sensor networks-part 1: Topology and design issues. *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, 2005.
- [23] Grape Networks. [www.grapenetworks.com](http://www.grapenetworks.com).
- [24] Maojua Wang Ning Wang, Naiqian Zhang. Wireless sensors in agriculture and food industry—recent development and future perspective. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2006.

- [25] Panasonic. Lr-wpan module p/n pan802154har application notes. 2005.
- [26] Andrew D. Parker. A guide for the clueless: Ieee 802.15.4 standard for low-rate wireless personal area networks. 2004.
- [27] Sanjay Lall Ritesh Madan. Distributed algorithms for maximum lifetime routing in wireless sensor networks. *IEEE Transactions on wireless communications*, 5(8), 2006.
- [28] R. Rodriguez. Mc1319x coexistence. Technical report, Freescale Semiconductor, 2005.
- [29] Freescale Semiconductor. Simple media access controller (smac) users guide.
- [30] Motorola Semiconductors. *HCS08 Microcontrollers data sheet*, 2003.
- [31] IEEE Computer Society. Part 15.4: Wireless medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications for low-rate wireless personal area networks (wpans).
- [32] Andrew S. Tanenbaum. *Redes de computadoras*. Prentice Hall, 2003.
- [33] Wayne Tomasi. *Sistemas de comunicaciones electrónicas*. Prentice Hall, 2003.
- [34] Urban Bilstrup Katrin Sjöberg Bertinl Svensson Per-Arne Wiberg. Capacity limitations in wireless sensor networks. In IEEE, editor, *Emerging Technologies and Factory Automation*, volume 1, pages 529–536, 2003.
- [35] Guido Stromberg Xiaolei Shi. Syncwuf: An ultra low-power mac protocol for wireless sensor networks. *IEEE Transactions on mobile computing*, 6(1):115–125, 2007.
- [36] Anna Scaglione Yao-Win Hong. Energy-efficient broadcasting with cooperative transmissions in wireless sensor networks. *IEEE Transactions on wireless communications*, 5(10):2844–2855, 2006.