

# UACM

Universidad Autónoma  
de la Ciudad de México

---

*Nada humano me es ajeno*

COLEGIO DE CIENCIA Y TECNOLOGIA

**LICENCIATURA EN INGENIERIA EN SISTEMAS ELECTRÓNICOS Y DE  
TELECOMUNICACIONES**

**“Diseño e Implementación de una Red de Sensores Inalámbrica basada en  
Tecnología ZigBee”**

TRABAJO RECEPCIONAL

PARA OBTENER EL TÍTULO DE LICENCIADA EN  
INGENIERÍA EN SISTEMAS ELECTRÓNICOS Y DE TELECOMUNICACIONES

PRESENTA:

**MARLENE CONTRERAS CALIXTO**

DIRECTOR DEL TRABAJO RECEPCIONAL

ING. AMARANTO DE JESÚS DÁVILA JÁUREGUI

MÉXICO D.F. FEBRERO 2013

## SISTEMA BIBLIOTECARIO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN



## UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE LA CIUDAD DE MÉXICO COORDINACIÓN ACADÉMICA

### RESTRICCIONES DE USO PARA LAS TESIS DIGITALES

### DERECHOS RESERVADOS<sup>©</sup>

La presente obra y cada uno de sus elementos está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor; por la Ley de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México, así como lo dispuesto por el Estatuto General Orgánico de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México; del mismo modo por lo establecido en el Acuerdo por el cual se aprueba la Norma mediante la que se Modifican, Adicionan y Derogan Diversas Disposiciones del Estatuto Orgánico de la Universidad de la Ciudad de México, aprobado por el Consejo de Gobierno el 29 de enero de 2002, con el objeto de definir las atribuciones de las diferentes unidades que forman la estructura de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México como organismo público autónomo y lo establecido en el Reglamento de Titulación de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México.

Por lo que el uso de su contenido, así como cada una de las partes que lo integran y que están bajo la tutela de la Ley Federal de Derecho de Autor, obliga a quien haga uso de la presente obra a considerar que solo lo realizará si es para fines educativos, académicos, de investigación o informativos y se compromete a citar esta fuente, así como a su autor ó autores. Por lo tanto, queda prohibida su reproducción total o parcial y cualquier uso diferente a los ya mencionados, los cuales serán reclamados por el titular de los derechos y sancionados conforme a la legislación aplicable.

## *Agradecimientos*

*A mis padres y hermanos ya que siempre me apoyaron y estuvieron conmigo.*

*Al profesor Amaranto Dávila porqué fue el primer profesor que creyó en mí, además con su dedicación y pasión a la ingeniería me enseñó que todo es posible.*

*A mis amigas, compañer@s y profesores que contribuyeron con su granito de arena, ya que de todos aprendí.*

*Agradezco a todas aquellas personas que creyeron en mí pero también a aquellas que no ya que de ahí también tome fuerzas para seguir adelante.*

*A los lectores por su apoyo, tiempo y dedicación.*

*A la UACM por darme la oportunidad de ser parte de esta institución y por el apoyo otorgado para la impresión y empastado de este trabajo.*

*Dedico esta tesis a mi hijo porque él fue un motor muy importante en esta travesía y estuvo de principio a fin. Johan esta es una muestra de que puedes lograr todo lo que te propongas.*

# Temario

## 1. INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.2 HIPÓTESIS .....	4
1.3 OBJETIVOS .....	4
1.4 JUSTIFICACIÓN .....	5
1.5 METODOLOGÍA .....	6
1.6 ALCANCES Y LIMITACIONES.....	6
REFERENCIAS.....	8

## 2. REDES INALÁMBRICAS

2.1 CARACTERÍSTICAS.....	9
2.2 TIPOS DE REDES INALÁMBRICAS.....	10
2.2.1 <i>Redes inalámbricas de corto alcance</i> .....	11
2.3 BLUETOOTH.....	13
2.3.1 <i>Arquitectura</i> .....	14
2.3.2 <i>Bandas de frecuencia y canales RF</i> .....	17
2.3.3 <i>Capa física y canales físicos</i> .....	18
2.3.4 <i>Capa de banda base</i> .....	19
2.3.4.1 <i>Características físicas</i> .....	19
2.3.5 <i>Control del alcance</i> .....	21
2.3.6 <i>Protocolo de Adaptación y Control de Enlace Lógico</i> .....	27
2.3.7 <i>Protocolo RFCOMM</i> .....	29
2.3.8 <i>Aplicaciones</i> .....	30
2.3.9 <i>Rendimientos y versiones</i> .....	32
2.4 REDES WLAN WI-FI.....	33
2.4.1 <i>Arquitectura</i> .....	33
2.4.1.1 <i>Modo infraestructura</i> .....	34
2.4.1.2 <i>Modo ad hoc</i> .....	36
2.4.1.3 <i>Modo de malla</i> .....	38
2.4.2 <i>Tipos y bandas de frecuencia</i> .....	42
2.4.3 <i>Diferentes capas físicas</i> .....	44
2.4.4 <i>Descripción de estructuras de subcapas</i> .....	46
2.4.5 <i>Servicio básicos</i> .....	47
REFERENCIAS.....	48

## 3. ZIGBEE

3.1 CARACTERÍSTICAS.....	49
--------------------------	----

3.2 ARQUITECTURA .....	51
3.2.1 Topología estrella .....	51
3.2.2 Topología de malla .....	52
3.2.3 Topología de árbol .....	53
3.3 RELACIÓN ENTRE ZIGBEE Y EL ESTÁNDAR IEEE 802.15.4 .....	55
3.4 FRECUENCIA DE OPERACION Y TASA DE DATOS .....	56
3.5 COMUNICACIÓN BÁSICA IEEE 802.15.4 Y ZIGBEE .....	58
3.5.1 CSMA-CA.....	58
3.5.2 Redes con Beacon habilitado vs sin Beacon .....	59
3.5.3 Método de transferencia de datos.....	60
3.5.4 Direccionamiento .....	60
3.6 ROLES Y TIPOS DE DISPOSITIVOS .....	61
3.7 HARDWARE .....	63
3.7.1 DIGI .....	63
3.7.1.1 Características principales .....	64
3.7.1.2 Operación de módulos de RF .....	66
REFERENCIAS .....	68

#### **4. DISEÑO DE LOS NODOS SENSORES**

4.1 DESCRIPCIÓN TÉCNICA DE LA AUTOMATIZACIÓN DE PRUEBAS DE PERICIA .....	69
4.1.1 Prueba de frenado .....	70
4.1.2 Prueba de estacionamiento en paralelo .....	71
4.1.3 Prueba de estacionamiento en batería .....	74
4.1.4 Prueba de zigzag .....	76
4.2 SENSORES Y DISPOSITIVOS .....	78
4.2.1 Acelerómetro de tres ejes MMA 7341L .....	79
4.2.1.1 Barrera de contención inteligente de golpes y poste delimitador inteligente .....	80
4.2.2 Ultrasónico SFR02 .....	81
4.2.2.1 Barrera de contención inteligente de distancia .....	83
4.2.3 Infrarrojo.....	84
4.2.3.1 Sensor de barrera infrarrojos .....	85
4.2.4 Temperatura TMP102 .....	86
4.2.5 Sensor radar .....	87
4.2.6 Interruptor .....	87
4.2.7 Pantalla informativa .....	88
4.3 DISEÑO DEL NODO SENSOR .....	90
4.3.1 Arquitectura del nodo sensor .....	90
4.3.1.1 Diseño de PCB para nodos sensores .....	91
4.3.1.2 Batería Fuente de energía .....	93
4.3.1.3 Microprocesador y puertos .....	94
4.3.1.4 Almacenamiento .....	95

4.3.1.5 Módulo XBee .....	98
4.4 CODIFICACIÓN DE NODOS SENSORES .....	99
REFERENCIAS.....	101
<b>5. DISEÑO DE LA RED Y ANÁLISIS DE DESEMPEÑO</b>	
5.1 ALGORITMO PARA LAS PRUEBAS DE MANEJO .....	102
5.1.1 Algoritmo para la prueba de frenado .....	103
5.1.2 Algoritmo para la prueba de estacionamiento en paralelo .....	105
5.1.3 Algoritmo para la prueba de estacionamiento en batería .....	107
5.1.4 Algoritmo para la prueba de zigzag .....	109
5.2 DISEÑO DE LA RED.....	113
5.2.1 Comunicación de Red ZigBee .....	113
5.2.1.1 Direccionamiento de red de 16 bits .....	114
5.2.1.2 Direccionamiento de 64 bits .....	115
5.2.2 Transmisión de datos .....	115
5.2.2.1 Transmisión de broadcast .....	115
5.2.2.2 Transmisión multicast .....	117
5.2.2.3 Transmisión de unicast .....	117
5.2.3 Descubrimiento de dirección de red.....	117
5.2.4 Algoritmo de ruteo AODV .....	118
5.3 ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DE LA RED Y NODO SENSOR .....	122
5.3.1 Modelo empírico WLAN .....	123
5.3.2 RSSI .....	126
5.3.3 Contador de datos transmitidos .....	128
5.3.4 Resultados en cuanto a distancia .....	129
REFERENCIAS.....	132
<b>6. CONCLUSIONES.....</b>	<b>133</b>

## 1. Introducción

El desarrollo tecnológico ha jugado un papel importante desde que el ser humano ha tratado de comunicarse con otros individuos, ya que no sólo ha bastado con comunicarse por medio del habla sino que ha buscado ser escuchado a grandes distancias. Desde entonces se han desarrollaron distintas técnicas para el envío de mensajes, desde señales físicas y visibles hasta las electromagnéticas, no visibles.

El día de hoy las telecomunicaciones están enfocadas a prestar este servicio, el intercambio de información. Éste se realiza por dos medios, el guiado y el no guiado. El medio guiado requiere de una guía por la cual viaja la información, ésta puede ser de cobre, fibra óptica, etc. El medio no guiado utiliza el espacio aéreo como medio de propagación, es aquí donde entran en juego las comunicaciones inalámbricas.

En la actualidad las comunicaciones inalámbricas están ganando terreno en comparación a las comunicaciones con medios guiados, esto debido a los beneficios y ventajas que estas proporcionan, entre las cuales tenemos:

**Movilidad** ya que un usuario o equipo puede conectarse a una red desde cualquier punto en el cual se cuente con cobertura.

**Fácil instalación** porque no se requiere cablear.

**Escalabilidad** debido a que se pueden integrar más usuarios o equipos a la red inicial.

**Reduce costos** porque no se necesita realizar una instalación de cableado, sobre todo en áreas geográficas de difícil acceso.

En la actualidad la información puede ser de diferentes tipos: voz, video o datos y cada vez hay más personas enviando y recibiendo información de manera inalámbrica ya sea desde sus teléfonos móviles o por medio de sus laptops. Con la evolución de la tecnología y su incorporación al hogar, surge la idea de automatizar los hogares para aumentar la calidad de vida del ser humano.

El mismo fenómeno se presenta en la industria, en donde se requiere supervisar y controlar los procesos industriales. Sin embargo, esto no siempre es posible ya que existen lugares en los que colocar cables es imposible por lo que las redes inalámbricas son ideales para solucionar esta limitante.

En la actualidad existen una gran variedad de protocolos y estándares enfocados a diferentes sistemas de comunicación inalámbrica, encontramos los que están diseñados específicamente para la transferencia de tasa alta de datos o tasa baja de datos, las que cubren distancias cortas o extensas, también aquellos en las que sus usuarios o equipos requieren estar desplazándose.

En un principio el objetivo principal de las comunicaciones inalámbricas de corto alcance era conectar dispositivos periféricos como impresoras, teléfonos móviles, dispositivos de audio, sensores o asistentes personales, PDAs. En la actualidad gracias al desarrollo de tecnologías como Bluetooth, Wi-Fi, ZigBee y conexiones infrarrojas estas

aplicaciones se han diversificado y actualmente son utilizadas en distintos ámbitos desde la industria hasta el uso personal, pasando por la medicina, la residencial, la agricultura y los electrodomésticos, ayudando a abaratar costos y hacer uso eficiente de los recursos disponibles.

### **1.1 Planteamiento del Problema**

En algunas ciudades el otorgamiento de licencias y permisos para conducir vehículos automotores requiere la aprobación de distintas pruebas, en las cuales los interesados deben demostrar que cuentan con los conocimientos y habilidades para conducir. Un examen muy importante es la prueba de manejo, ésta prueba normalmente se realiza en un espacio con obstáculos y condiciones físicas que sirven para evaluar las habilidades mínimas que se requieren para conducir un vehículo, por mencionar algunas se encuentran: conducir en reversa, saber estacionarse, maniobrar el vehículo en lugares estrechos o detenerse ante una luz roja, frenado suavemente. Estas pruebas normalmente las aplican uno o varios examinadores, que observan si las pruebas se realizan adecuadamente y al finalizar determinan si las aprueban.

Para un examinador aplicar estas pruebas es monótono, y por lo tanto se pueden presentar casos en el que las pruebas no se evalúen correctamente debido a errores humanos, una posible solución es diseñar e implementar una red inalámbrica de sensores para la automatización de pruebas de manejo.

Al contar con sensores en el área de pruebas que registren la velocidad del automóvil, si se golpeó o no alguna barrera u obstáculo, si se detuvo o no dentro del límite establecido, se recopilará información que ayuda a obtener resultados más confiables y

certeros acerca de las pruebas, además estos datos podrán ser analizados y procesados posteriormente para su estudio en diversas áreas de ingeniería de transporte.

## **1.2 Hipótesis**

Es posible diseñar e implementar una red de sensores inalámbrica con un estándar de alta eficiencia energética, de baja tasa de datos y a bajo costo, con la finalidad de automatizar pruebas prácticas de manejo y adquirir datos de ingeniería de tránsito en tiempo real.

## **1.3 Objetivo**

Diseñar e implementar una red inalámbrica de sensores basada en el protocolo ZigBee, para el monitoreo, sensado y control de diversas variables asociadas a los dispositivos remotos utilizados para la automatización de pruebas de manejo y adquisición de datos de ingeniería de tránsito en tiempo real que cumpla con las siguientes características:

- Bajo consumo de energía
- Baja tasa de datos
- Alcance medio (30 metros)
- Portátil

## **1.4 Justificación**

Hoy en día en la ciudad de México adquirir una licencia para conducir un vehículo particular es relativamente sencillo, únicamente se requiere un comprobante de domicilio, una identificación oficial y el pago de derechos establecido por el Código Fiscal del D.F; por lo tanto no se realizan pruebas de manejo. Esto puede contribuir en el incremento de los accidentes automovilísticos, ya que al otorgarse una licencia al conductor sin ser evaluado no se tiene la certeza de que el individuo conozca al menos el reglamento de tránsito ni que cuente con las habilidades y conocimientos mínimos necesarios para conducir un vehículo automotor.

La atención y hospitalización a víctimas de accidentes viales le cuesta a la ciudad de México cerca de 1500 millones de pesos al año [1]. Los accidentes son por diferentes causas y en ellos se ven involucrados los conductores jóvenes. En éstos accidentes se presentan desde lesiones leves hasta las graves, incapacidades y pérdidas humanas.

Una de las razones por las que no se realizan exámenes prácticos es debido a la gran población de la ciudad, más de 8 millones de personas. Esto implicaría una gran cantidad de tiempo, por lo que la lista de espera para obtener una licencia sería muy larga ya que no se podría dar el servicio a todas aquellas personas que la solicitaran.

El tener un sistema automatizado para realizar la prueba de manejo, disminuiría el tiempo en que se realiza la prueba y beneficiaría enormemente a la seguridad vial de la ciudad de México ya que se garantizaría que los conductores cuentan con los conocimientos y habilidades básicas para la conducción de un vehículo. Además, al ser un sistema de pruebas automatizadas se tienen distintas ventajas como reducción de

costos, atención más ágil, exactitud en las mediciones y resultados, así como la reducción de las posibilidades de corrupción.

## **1.5 Metodología**

Para plantear el problema y proponer una solución se utilizará un método hipotético-deductivo [2]. Después se realizará el estudio del arte de redes inalámbricas y del protocolo ZigBee, así como el diseño del nodo sensor o módulo base necesarios para resolver el problema

Posteriormente se realizarán pruebas de caracterización y estudio del desempeño del los modulo base para observar el comportamiento de la red. Las pruebas serán en base a la distancia que hay entre módulos, el número de dispositivos, y la integridad de los datos.

Finalmente se dará una propuesta del diseño y se implementará la red en base al resultado de las pruebas y las necesidades del sistema.

## **1.6 Alcances y limitaciones**

Se diseñará un nodo sensor para una red de inalámbrica que será utilizada en pruebas de manejo. Así mismos se verificará su funcionamiento, el cual nos indicará que tan viable es utilizar este tipo de tecnología.

La información obtenida de cada sensor no se almacenará en una base de datos, solo será enviada y recibida dentro de la red, por lo que tampoco se procesará esta información.

Las pruebas que se realizarán se harán con algunos dispositivos y en un área con condiciones similares a las que se tienen cuando se aplican dichas pruebas.

## Referencias

[1] Kenya Ramírez. Cuestan 1,500 mdp los accidentes viales. Periódico Excelsior [en línea]. Sábado 13 de noviembre de 2010. Disponible en internet: <http://www.excelsior.com.mx/PlugIn/flipbook/periodico.php?seccion=flip-comunidad&fecha=13-11-2010>

[2] Cegarra Sánchez, José, *Metodología de la investigación científica y tecnológica*, Ediciones Días de Santos, Madrid, 2004, pp 82.

### Redes Inalámbricas

Las redes inalámbricas (*wireless network*) se comunican mediante medios no guiados, es decir la información viaja a través de la atmósfera, por medio de ondas electromagnéticas. La transmisión y recepción de información se hace por medio de antenas.

#### 2.1 Características

Las ventajas que podemos encontrar en estas redes son:

- Una rápida instalación de la red ya que no se necesita cablear. Para el caso de distancias grandes, no se tramitan permisos para perforar y/o levantar pavimento.
- Reducción en los costos tanto en mantenimiento como en el reemplazo de cables.
- Movilidad ya que el usuario puede cambiar de lugar dentro del radio de cobertura.
- Accesible debido a que varios dispositivos ya cuentan con diferentes tecnologías inalámbricas.

- Es la solución para zonas rurales, en donde llegar a ella por medio de cable sería muy costoso.
- Productividad, los usuarios realizan su trabajo cuándo y dónde les es más conveniente, por ejemplo una sala de espera.

Las desventajas que podemos encontrar son:

- Se ven afectadas por los cambios atmosféricos los cuales pueden ocasionar incomunicación.
- Mayor interferencia.
- Sensibilidad al ruido.
- La tasa de transmisión de la información es menor en comparación con redes cableadas.
- Poca Seguridad ya que al propagarse por el aire puede ser interceptada la información.
- Dependiendo de la tecnología el costo inicial puede ser costoso ya que se requiere comprar dispositivos, antenas, pago por el uso del espectro radioeléctrico, invertir en encriptación, entre otros.

## **2.2 Tipos de redes inalámbricas**

Las redes inalámbricas se pueden clasificar en varios tipos según su alcance y/o su tecnología, ver Figura 2.1:

- WPAN (*Wireless Personal Area Network*), Red inalámbrica de área personal.
- WLAN (*Wireless Local Area Network*), Red inalámbrica de área local.

- WMAN (*Wireless Metropolitan Area Network*), Red inalámbrica de área metropolitana
- WWAN (*Wireless Wide Area Network*), Red inalámbrica de área mundial.

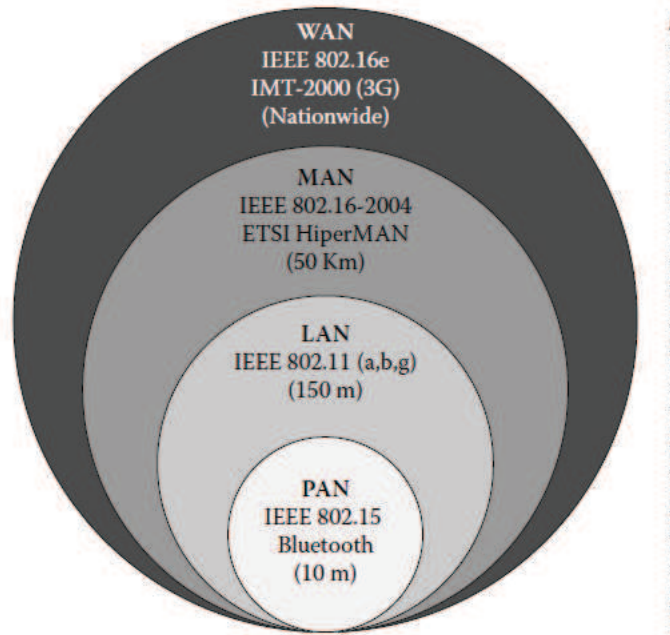


Figura 2.1 Expansión de rango de red para satisfacer las necesidades actuales [1]

### 2.2.1 Redes inalámbricas de corto alcance

Las redes inalámbricas de corto alcance se dividen en dos categorías esencialmente: redes inalámbricas de área local (WLAN) y redes inalámbricas de área personal (WPAN).

Una WLAN es un replazo o extensión del cableado de redes de área local (LAN) tales como Ethernet (IEEE 802.3). Un dispositivo WLAN puede ser integrado a una red LAN cableada, una vez que el dispositivo WLAN se convierte en parte de la red, la red trata a los dispositivos inalámbricos de la misma manera que cualquier otro dispositivo con

conexión de cable dentro de la red. El objetivo de la WLAN es el de maximizar el alcance y la tasa de datos [2].

Por otro lado una WPAN se utiliza para transmitir información a distancias relativamente cortas, espacio de operación personal (POS, *personal operating space*) de 10 metros. A diferencia de las redes inalámbricas de área local (WLAN), las conexiones efectuadas vía WPAN implican poca o ninguna infraestructura. Esta característica permite implementar una amplia serie de dispositivos pequeños, con bajo consumo de energía y soluciones de bajo costo [3].

Las WPAN se dividen en tres clases: alta tasa de datos (HR) WPAN, media tasa de datos (MR) WPAN y baja tasas de datos (LR) WPAN, ver Figura 2.2. Un ejemplo de una HR-WPAN es el estándar IEEE 802.15.3 con una tasa de datos que va desde los 11 hasta los 55 Mbps, esta alta tasa de datos se utiliza en aplicaciones de transmisión de archivos de video o imágenes digitales [4]. Bluetooth, con una tasa de datos de 1 a 3 Mbps, es un ejemplo de una MR-LAN y puede ser usado en transmisión de voz de alta calidad en un manos libres inalámbrico. ZigBee, con una máxima tasa de datos de 250 Kbps, es clasificado como una LR-WPAN.

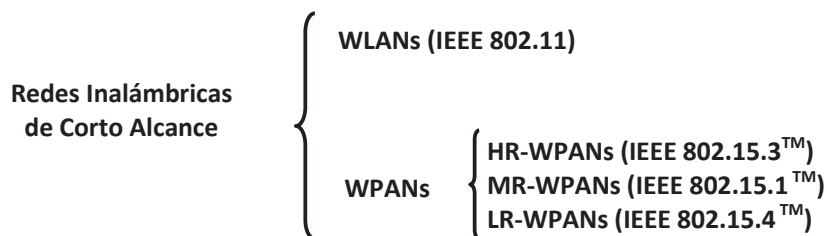


Figura 2.2 Redes Inalámbricas de Corto Alcance

Para tener un panorama más amplio acerca de las WPANs se darán detalles acerca de Bluetooth y Wi-Fi en este capítulo, ya que son las tecnologías líderes en el mercado, y otro capítulo será destinado únicamente a ZigBee.

### **2.3 Bluetooth™**

La tecnología Bluetooth tiene como objetivo permitir la comunicación inalámbrica de corto alcance entre varios dispositivos. Desarrollado originalmente por Ericsson, Bluetooth se somete a la evolución de sus especificaciones, mantenido y desarrollado por el Grupo de Interés Especial de Bluetooth (*Special Interest Group*, SIG) y normalizado por la IEEE de acuerdo a la referencia IEEE 802.15.1.

La idea rectora detrás de Bluetooth consiste en las especificaciones de una extensa serie de circuitos integrados, que se desplegará en una escala muy grande de varios tipos de equipos, con un consumo energético muy reducido y por lo tanto a un bajo precio.

En 1994 Ericsson Mobile Communications puso en marcha un estudio de viabilidad de la interfaz de radio de bajo costo - bajo consumo para ser usado entre teléfonos móviles y sus accesorios. En febrero de 1998, IBM, Intel, Nokia y Toshiba se unen a la compañía y en mayo crean la SIG. Fue ampliándose con la llegada de 3Com, Agere (Lucent Technologies), Microsoft y Motorola durante el año 2000 y no cesa de incrementar, por lo que se integran agentes que cubren varias áreas de especialización como la telefonía celular, computadoras portátiles, automóviles y de procesamiento digital.

### 2.3.1 Arquitectura

La comunicación Bluetooth requiere de dos cosas preliminares: en primer lugar se tienen que conocer a los dispositivos de los alrededores (descubrimiento) y en segundo lugar debe existir un circuito preestablecido. La comunicación se basa en el principio maestro-esclavo. Un grupo de equipos forma una célula llamada *piconet*, ver Figura 2.3, una *piconet* cuenta con un maestro y siete esclavos como máximo, además puede haber hasta 255 nodos permanentes en la red. Éstos son dispositivos que el maestro ha cambiado a un estado de bajo consumo de energía para reducir el desgaste de pilas, lo único que uno de estos dispositivos puede hacer es responder a una señal de activación por parte del maestro.

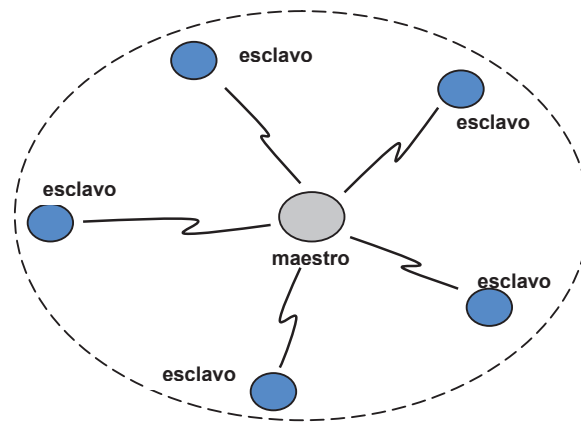
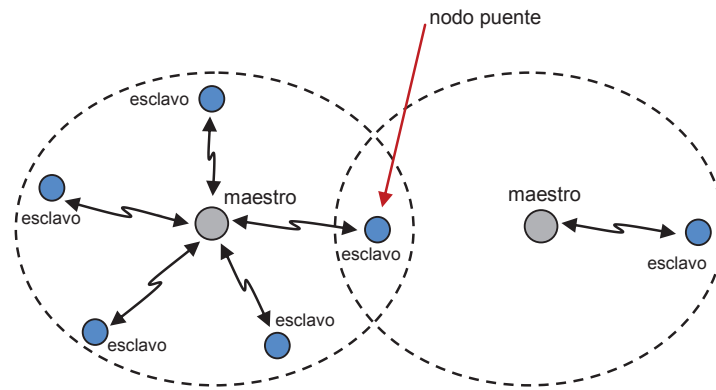


Figura 2.3 Arquitectura Maestro-esclavo

Varias *piconets* pueden interconectarse con un nodo puente y formar una “*scatternet*” (ver Figura 2.4).



**Figura 2.4 Scatternet**

En una *piconet* la comunicación la administra el maestro el cual organiza las frecuencias y canales, también se sabe de los vecinos mediante la fase de descubrimiento. En una *scatternet* es necesario trazar una ruta para intercambiar datos entre el maestro y los nodos de retransmisión. Las redes *scatternets* en Bluetooth no están bien desarrolladas. Se han mejorado los procedimientos específicos de enrutamiento en los estándares posteriores, tales como ZigBee.

Dos dispositivos esclavos no pueden hablar directamente entre si, excepto durante la fase de descubrimiento. La asignación de canales y el establecimiento de comunicación se encuentran bajo la responsabilidad del maestro. El maestro es responsable de los nodos elegidos, así como la asignación o bloqueo del ancho de banda de una nueva conexión, también es responsable de ajustar el reloj de sincronización de la *piconet* y decidir la secuencia de saltos de frecuencia (*Frequency Hopping Sequence, FHS*). Un esclavo puede ser parte de varias *piconets*.

Una de las principales características interesantes de la tecnología es que no depende de una dirección IP. Esta decisión de diseño facilita la implementación de dispositivos que no necesitan preocuparse sobre los problemas de la capa superior tales como la asignación de direcciones, un router por defecto, máscara de red, etc. La configuración automática es por lo tanto mucho más fácil.

En Bluetooth se identifican varios protocolos:

- Protocolos de la capa inferior: banda base, LMP, L2CAP, protocolo de descubrimiento de servicios (SDP)
- Protocolo de Interfaz: RFCOMM
- Especificaciones de control aplicativo: TCS Binario, Comandos AT
- Protocolos Aplicativos: PPP, TCP/IP, OBEX, WAP, vCard, vCal, WAE

Como se puede ver las aplicaciones forman parte de las especificaciones generales. Para una mejor comprensión del modo de operación de Bluetooth se muestran los protocolos en la Figura 2.5 y así como sus objetivos.

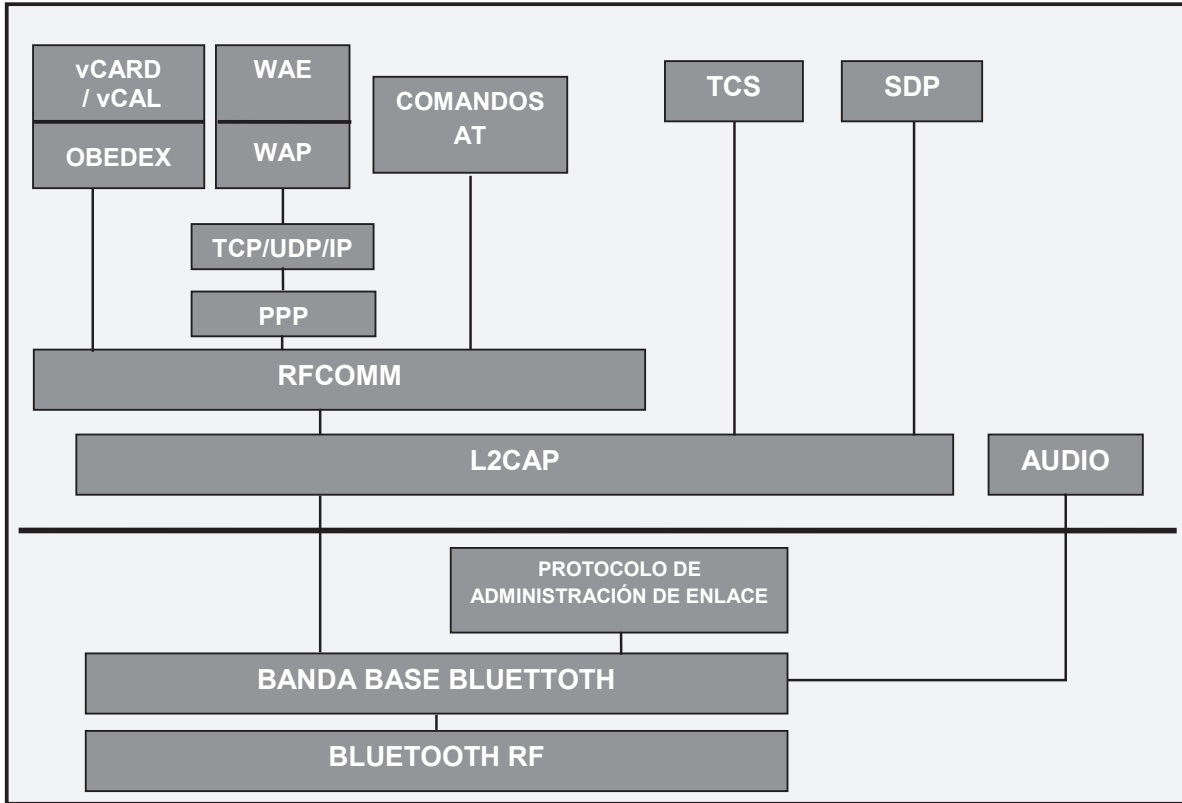


Figura 2.5 Arquitectura general de pila

### 2.3.2 Bandas de Frecuencia y Canales de RF

Bluetooth opera en la banda ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) de 2.4 GHz, en el cual son posibles 79 canales con un ancho de banda de 1MHz por canal. La Tabla 2.1 muestra algunas restricciones en los diferentes países.

Países	Rango de frecuencias [MHz]	Canales RF	
Europa y E.U.	2400 - 2483.5	$f=2402+k$	$k=0,\dots,78$
Francia	2446.5 – 2483.5	$f=2454+k$	$k=0,\dots,22$
España	2445 - 2475	$f=2449+k$	$k=0,\dots,22$

Tabla 2.1 Banda de Frecuencias y canales RF

Se tienen tres diferentes clases de dispositivos:

- Clase 1: está asignado a dispositivos con altas tasas, tales como puntos de acceso de Bluetooth (aproximadamente 100 m) y una potencia de 20dBm (100mW).
- Clase 2: para PC's y conectar dispositivos portátiles (aproximadamente 10 m) y una potencia de 4dBm (2.5mW).
- Clase 3: para dispositivos de baja potencia (distancias menores a 1 m) y potencia 0dBm (1mW).

Estos valores de potencia se miden en la entrada de la antena, aunque nada evita que un dispositivo varíe dinámicamente su potencia. El receptor debe tener una sensibilidad de  $-70dBm$  para detectar equipos lejanos.

### **2.3.3 Capa Física y Canales Físicos**

La capa física se basa, en el salto de frecuencia con modulación GFSK. La modulación produce 1 millón de símbolos para un rendimiento total de 712 Kbps. En este tipo de modulación se genera un uno binario para una desviación de frecuencia positiva y un cero binario para una desviación de frecuencia negativa. La ventaja de esta técnica es que no requiere de una demodulación compleja y front-ends RF. Se usan 79 canales en el estándar pero algunas veces, de acuerdo a cada país, se pueden usar menos canales y por lo tanto se tiene un menor ancho de banda a nivel mundial.

### 2.3.4 Capa de Banda Base

Es una capa que implementa una gran cantidad de procedimientos, enlaza la transmisión para la modulación y la codificación del radio, el reloj, formato de paquete de datos, roles maestro/esclavo, administración de conexión y/o estado de suspensión de máquinas, control de enlace y transmisión de audio, corrección de errores de enlace de bajada, (*Forward Error Correction, FEC*), también el de código se define aquí.

#### 2.3.4.1 Características Físicas

**Canales Físicos.** El canal lógico es asignado a uno físico. Está representado por la secuencia de salto pseudo-aleatorio elegido entre los 79 o 23 canales de RF disponibles en la banda de 2.4 GHz. Los dispositivos Bluetooth que utilizan la misma secuencia forman una *piconet*. La secuencia de salto es única para cada *piconet* excepto si ésta es adaptada para un canal, el reloj del maestro es el que se utiliza. El canal está dividido en intervalos de tiempo o ranuras de tiempo, cada intervalo de tiempo corresponde a una frecuencia, de manera que dos ranuras consecutivas corresponden a dos frecuencias. Normalmente el maestro usa una frecuencia para el enlace de bajada y el esclavo usa la ranura siguiente para el enlace de subida. La técnica de multiplexaje por división de tiempo es dúplex (*Time Division Duplex, TDD*), es decir, el maestro y esclavo transmiten alternativamente, el maestro transmite en las ranuras par y los esclavos en las ranuras impares. Los intervalos de tiempo o ranuras están numerados y duran 625µs cada uno, lo mismo que dura un salto.

Los datos transmitidos por las unidades Bluetooth utilizan paquetes. Un paquete corresponde a la yuxtaposición de 1-5 ranuras de tiempo consecutivas. Cuando un

paquete tiene el tamaño de 1 ranura se habla de una transmisión y/o recepción de una sola ranura y cuando un paquete tiene un tamaño mayor a 1 ranura de tiempo se habla de una transmisión de multi-ranura. La norma aplicada al salto de frecuencia del mandato de paquetes es que el comienzo del paquete será alineado en el comienzo de la ranura. El salto de frecuencia se mantiene fijo durante toda la transmisión del paquete.

**Enlace Lógico.** Existen varios tipos de enlaces que se pueden establecer entre un maestro y un esclavo (o varios). A continuación se muestran las más usadas:

- Síncrono Orientado a Conexión, SCO.
- Extendido SCO, ESCO.
- Asíncrono Orientado a Conexión, ACL.

SCO se utiliza para:

- Comunicación de voz en modo de circuito
- Servicios simétricos y síncronos

La reserva de ranuras para los intervalos regulares es de 64 Kbps por ranura. El enlace SCO es simétrico es decir tienes las mismas ranuras para el enlace de subida como para el de bajada y son punto a punto.

ESCO es de enlace asimétrico y ofrece más tipos de paquetes soportados en su comunicación.

Los enlaces ACL se utilizan para:

- Comunicación de datos
- Servicios asíncronos simétricos y asimétricos.
- Descubrimiento y paginación

En general, todas las señalizaciones usan el ACL. También por default cualquier esclavo tiene una comunicación ACL con el maestro. El máximo rendimiento que un usuario tiene en un enlace asíncrono es de 723.2 Kbps para la fase 1 de dispositivos Bluetooth.

**Combinaciones de enlaces.** El nodo maestro puede elegir cualquier combinación de tipo de enlace. La elección se deja abierta para elegir entre SCO o una conexión ESCO, si los parámetros de aplicación lo permiten, una conexión ACL puede utilizarse simultáneamente (ésta siempre está presente). Sin embargo hay una condición importante que indica que nada puede suceder antes de que el nodo se conecte y esto no puede suceder antes de establecer una conexión primaria ACL con el maestro, como se dijo anteriormente. La lógica detrás de esto es para permitir al nodo recibir mandos del maestro en cualquier momento.

### 2.3.5 Control de Enlace

Antes de que el maestro y los esclavos puedan comunicarse entre sí, tienen que establecer la piconet usando un mecanismo de control de enlace o el Control de Estado de Enlace.

Una estación puede estar en uno de un número de Control de Estado de Enlace, ver Figura 2.6. Hay dos estados principales: *Conexión* y *Standby* (en espera). Además hay

subestados con sus operaciones asociadas: *page*, *page scan*, *inquiry* e *inquiry scan*. Estos procedimientos se utilizan para establecer una piconet o añadir nuevos esclavos a una ya existente, los subestados son estados transitorios entre los estados de *Conexión* y *Standby*.

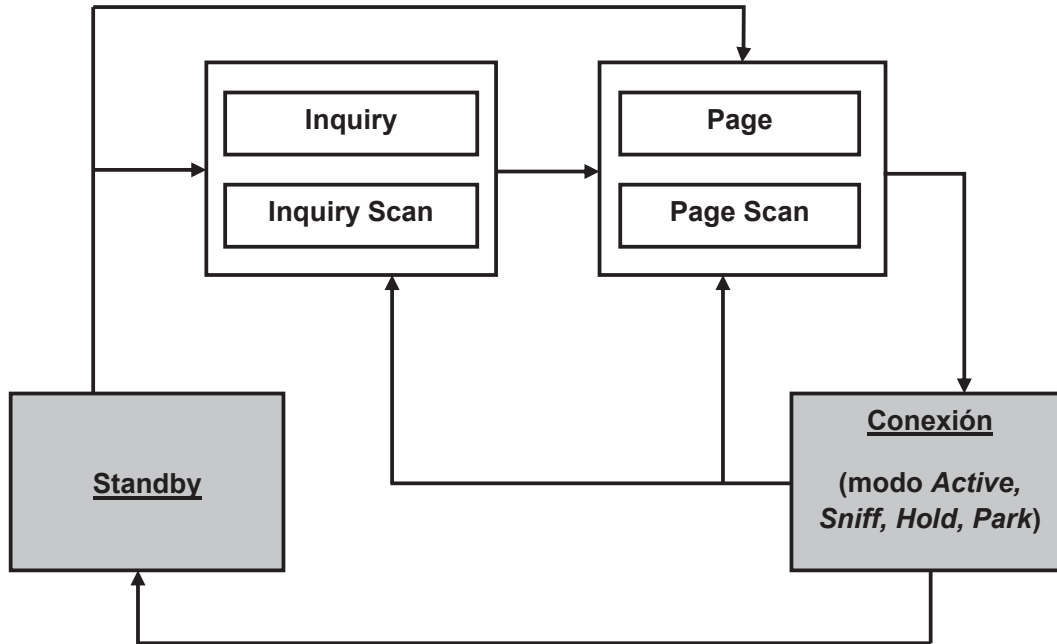


Figura 2.6 Diagrama de Control de Estado de Enlace

El estado predeterminado en una estación es *Standby*, que es un modo de bajo consumo de energía, este estado no está asociado con alguna piconet. En ocasiones el Control de Enlace puede salir de este estado para escanear los mensajes de *page* o *inquiry*, o realizar un *page* o *inquiry* para sí mismo. Si la estación recibe un mensaje *page* o *inquiry*, entra en el estado de *Conexión* y se convierte en un esclavo., si la estación transmite un mensaje *page* o *inquiry* con éxito, pasa al estado de *Conexión* y se convierte en un Maestro.

Los procedimientos de *inquiry* son los procesos de interacción entre la estación en el subestado *inquiry* (llamado estación *inquiry*) y la estación en el subestado *inquiry scan* (estación *inquiry-scan*) *Inquiry* se usa cuando la dirección del dispositivo destino es desconocido para la fuente. Las estaciones *inquiry* son las estaciones que quieren descubrir nuevas estaciones que se encuentran dentro de su rango de transmisión. Las estaciones *inquiry-scan* son las estaciones que desean ser descubiertas por otra estación. La estación *inquiry* transmite los mensajes *inquiry* (que contiene IAC) con una frecuencia que sigue la secuencia de salto de frecuencia *inquiry*. La estación *inquiry-scan* explora el mensaje *inquiry* de un sólo salto de frecuencia. La estación *inquiry-scan* pueden recibir los mensajes *inquiry* siempre que la estación *inquiry* transmita en la misma frecuencia, después de recibir los mensajes *inquiry* con éxito, la estación *inquiry-scan* enviará a la estación *inquiry* el mensaje de respuesta que contiene la dirección dispositivo y el reloj. En resumen durante este proceso la estación *inquiry* recopila las direcciones de los dispositivos y los relojes de todas las estaciones que respondieron al mensaje *inquiry*. Basados en esta información la estación *inquiry* puede emitir una mensaje *page* para establecer una conexión a estaciones conocidas.

Los procedimientos de *paging* se usan para establecer nuevas conexiones entre el maestro y un esclavo. El subestado *paging* es desplegado por el maestro para establecer una nueva conexión con el esclavo que esta en el estado en el subestado de *paging-scan*. Los procedimientos de *paging* son similares a los procedimientos de *inquiry*. El maestro intenta conectarse con el esclavo objetivo para transmitir repetidamente códigos de acceso a dispositivos esclavo (*device acces code, DAC*) en los diferentes canales de salto. Puesto que los relojes del maestro y el esclavo no se han sincronizado, el maestro no sabe exactamente cuando el esclavo despertará y sobre que canal saltará. El maestro

predice los canales de salto donde el esclavo debe estar, por ejemplo, para recordar detalles de los últimos intercambios de paquetes. Basados en esta predicción se transmite una serie de los mismos DACs en el canal previsto así como los otros canales y escucha entre transmisiones para dar una respuesta al esclavo. En un *page scan* un esclavo escucha por su propio DAC el tiempo que dura la ventana de exploración. Durante esa ventana, el esclavo escucha en un solo salto de frecuencia, su correlación corresponde a su código de acceso del dispositivo. Cuando un esclavo entra en *page scan* este selecciona la frecuencia de exploración de acuerdo a la secuencia de salto *page* correspondiente a su dirección del dispositivo estación. El maestro transmite mensajes *paging* más frecuentemente que en las transmisiones de paquetes de datos normales. El maestro determina su frecuencia de *paging* de secuencia de salto basado en sus direcciones de dispositivos, los esclavos escuchan o exploran en una frecuencia fija. Si un esclavo recibe los mensajes *paging* este transmitirá un mensaje de respuesta *paging* que contiene su DAC. Entonces el maestro transmite los mensajes FHS en orden para que el esclavo se sincronice 1) a la frecuencia de secuencia del canal de salto y 2) para el reloj. Entonces el esclavo responde con un paquete FHS y se convierte en un nodo activo de la piconet.

En modo *standby*, aún no se ha establecido una conexión y la estación puede usar todo de su capacidad para soportar un *page scan*. Si lo desea, la estación puede colocar una conexión ACL en el modo *Hold* o incluso usar el modo *Park* antes de entrar al *page scan*. La conexión SCO preferentemente no interrumpe para *page scan*. En este caso *page scan* puede ser interrumpida por las ranuras SCO reservadas que tiene mayores prioridades que los *page scan*.

En el estado de *Conexión*, una estación Bluetooth se convierte en el miembro de una piconet. La estación puede estar en uno de los siguientes cuatro modos de conexión. *Active*, *Sniff*, *Hold* y *Park*. Estos modos de conexión se usan para ahorrar energía y para permitir a las estaciones comunicarse con diferentes piconets.

Modo *Active*: en este modo la estación puede comunicarse activamente en el canal inalámbrico. A una piconet se le permite tener hasta ocho estaciones en modo *Active* al mismo tiempo. Los maestros programan la transmisión en base a las necesidades del tráfico hacia y desde los esclavos, además el maestro soporta transmisiones regulares para mantener a los esclavos sincronizados en el canal. Los esclavos *Active* escuchan durante las ranuras maestro a esclavo. Si un esclavo *Active* no está direccionado, puede dormir hasta la siguiente nueva transmisión del maestro. Una transmisión periódica del maestro es requerida para mantener a los esclavos sincronizados en el canal. Ya que los esclavos solo necesitan el código de acceso al canal para la sincronización.

Modo *Sniff*: las estaciones esclavas pueden cambiar a un modo de ahorro de energía en la cual la actividad de la estación se reduce. En el modo *Sniff* las estaciones esclavo escuchan a la piconet con menos frecuencia, lo que reduce el consumo de energía. Si un esclavo participa en un enlace ACL, este tiene que escuchar el tráfico del maestro en cada ranura ACL. El intervalo de tiempo entre eventos consecutivos escuchados es programable por la aplicación.

El modo *Hold*: es otro cambio de modo de ahorro de energía de las estaciones esclavo. Durante el estado de *Conexión*, el enlace ACL para un esclavo puede ser en modo *Hold*, esto significa que el esclavo temporalmente no soporta paquetes ACL sin dejar de apoyar a los posibles enlaces SCO. En tanto que en modo *Hold*, la estación puede ejecutar

procedimientos como son *scan*, *page*, *inquiry* o comunicarse con otras piconets. Antes de que el esclavo entre en modo Hold, el maestro y el esclavo tienen que estar de acuerdo en la duración del tiempo que el esclavo puede permanecer en este modo. Una vez que finalice este tiempo la estación regresará al modo Active, se sincroniza con el tráfico y espera instrucciones del maestro.

Modo *Park*: en este modo la estación esclavo está todavía sincronizada con la piconet pero no se comunican. La estación *Parked* abandona su dirección de miembro activo y solo ocasionalmente escucha el tráfico del maestro para sincronizarse y comprobar si hay mensajes de broadcast. Para soportar esclavos *Parked*, el maestro establece un canal de beacon donde uno o más esclavos son *Parked* y transmite en estos canales una serie de ranuras beacon a intervalos de tiempo constante.

**Creación de una piconet** .Una piconet es administrada totalmente por el maestro, el cual determina el direccionamiento, la secuencia de salto de frecuencia y el código de acceso al canal (el código que identifica de forma única a la piconet). Puesto que Bluetooth está basado en TDD, cada estación tiene sistemas de reloj interno que determina el momento y el salto del radio transceptor, éste reloj no tiene ninguna relación con la hora del día y por lo tanto puede ser inicializado en cualquier valor, no requiere ajustes y nunca se apaga. Para la sincronización con otras unidades sólo compensa su uso y se añade al reloj interno nativo. Para asegurar la sincronización, el maestro establece el ritmo a todos los esclavos en función de su reloj para transmitir su reloj de lectura. Los esclavos añaden un valor de compensación a sus relojes nativos para que puedan ser sincronizados con el reloj maestro, puesto que los relojes están corriendo de manera libre la compensación tiene que ser actualizada regularmente. La formación de piconets es controlada por el

Control de Estado de Enlace, la Figura 2.7 muestra la secuencia de establecimiento de una piconet.

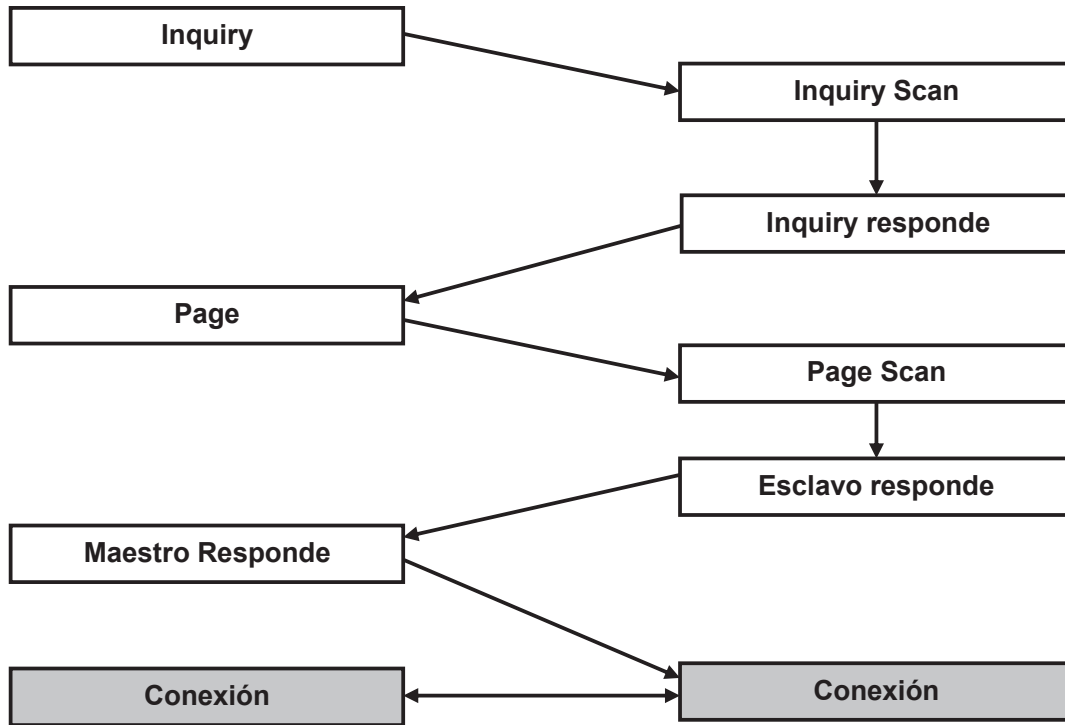


Figura 2.7 Secuencia para formar una piconet

### 2.3.6 Protocolo de Adaptación y Control de Enlace Lógico

El protocolo de adaptación y control de enlace lógico (L2CAP) está en el mismo nivel así como el LMP pero éste usa sus instalaciones para establecer un enlace. Esto no es equivalente al mundo IP ya que es un protocolo de establecimiento de conexión, L2CAP es visto por aplicaciones que se ejecutan en dispositivos como son teléfonos y PDAs. El número de puerto por ejemplo es lo mismo que en los protocolos TCP/IP, UDP/IP donde se indica el número de puerto para la aplicación. Éste permite a los protocolos de

aplicación enviar PDUs (*Protocol Data Unit*) hasta de 64 Kbits e implementar segmentación y montaje. Un identificador de canal (*channel identifier, CID*) ayuda a identificar la conexión.

Hay tres tipos de enlaces L2CAP:

1. Enlaces de canal bidireccional de señalización.
2. Conexión de tráfico de datos bidireccionales.
3. Conexiones multicast unidireccional. Esto significa que L2CAP gestiona las comunicaciones multicast para Bluetooth.

L2CAP usa enlaces ACL de la banda base y no depende del LMP, Figura 2.7.

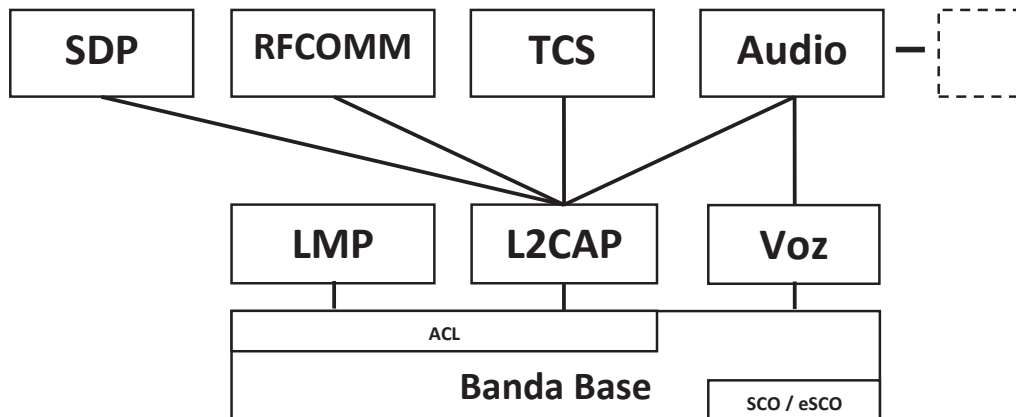


Figura 2.7 Interacción entre L2CAP y otras capas

Otras de las funciones del L2CAP son:

**Multiplexaje**, ya que tiene un tipo de encabezado diferente de los protocolos anteriores, y es capaz de distinguir los protocolos por ejemplo SDP, RFCOMM y TCS. Los comandos son enviados en un enlace ACL especial y se llaman C-frames.

**Calidad de servicio, QoS**, el proceso de establecimiento de conexión permite el intercambio de información para una QoS establecida entre dos dispositivos Bluetooth, está sobre el nivel de la configuración de solicitud y la configuración de respuesta ya que una opción de campo está reservada para este uso. Prácticamente, la QoS es asignada sobre enlaces ESCO o SCO para proporcionar el ancho de banda requerido.

**Segmentación y reensamblaje**, en la capa de banda base los paquetes son limitados en tamaño (345 octetos para DH5). Esto no es una buena solución para algunas aplicaciones que necesitan mayor MTUs (*Maximum Transfer Unit*). Varios paquetes de la capa de banda base pueden, por lo tanto, ser reensamblados en un solo MTU L2CAP o viceversa.

### **2.3.7 Protocolo RFCOMM**

El protocolo RFCOMM emula los puertos serie y USB a través del protocolo L2CAP. Utiliza un estándar ETSI (TS 07.10) para este propósito. Es compatible con todas las aplicaciones que usan el puerto de comunicación serie. RFCOMM proporciona una transferencia de datos confiable, conexiones simultáneas y control de flujo.

RFCOMM soporta hasta 60 puertos abiertos. Una conexión identificadora de enlace de datos (*data link connection identifier, DLCI*) identifica los enlaces entre un cliente y los servicios de aplicación.

La aplicación del comando AT se usa para la comunicación entre dispositivos compatibles con la aplicación del módem como son teléfonos, móviles y equipos de FAX. La capa AT se aplica directamente sobre el RFCOMM.

### **2.3.8 Aplicaciones**

La telefonía móvil es uno de los primeros mercados interesados en Bluetooth. Otro tipo de aplicación es en los equipos de procesamiento de datos como impresoras portátiles, PCs, ratones, organizadores, también en audio, sistemas Hi-Fi, cámaras, pago de banca a distancia y aplicaciones en automóviles.

A una aplicación se le llama perfil. El perfil ofrece detalles sobre los parámetros de los protocolos y configuraciones, para que el dispositivo sea capaz de descubrir estas aplicaciones y comunicarse de una manera uniforme. Las especificaciones Bluetooth v1.1 tiene asignado el soporte de 13 aplicaciones y proporciona diferentes pilas de protocolos para cada una [5]. En la Figura 2.8 se describen las 13 aplicaciones.

<b>Nombre</b>	<b>Descripción</b>
Acceso genérico	Procedimiento para el manejo de enlaces
Descubrimiento de servicios	Protocolo para descubrir los servicios que se ofrecen
Puente serie	Reemplazo para un cable de puerto serie
Intercambio genérico de objetos	Define la relación cliente-servidor para el traslado de objetos
Acceso a LAN	Protocolo entre una computadora móvil y una LAN fija
Acceso telefónico a redes	Permite que una computadora portátil realice una llamada por medio de un teléfono móvil
Fax	Permite que un fax móvil se comunique con un teléfono móvil
Telefonía inalámbrica	Conecta un handset (telefónico) con su estación base local
Intercom (intercomunicador)	Walkie-talkie digital
Headset (diadema telefónica)	Posibilita la comunicación de voz sin utilizar las manos
Envío de objetos	Ofrece una manera de intercambiar objetos simples
Transferencia de archivos	Proporciona una característica para la transferencia de archivos más general
Sincronización	Permite a un PDA sincronizarse con otra computadora

**Figura 2.8 Los perfiles de Bluetooth.**

El perfil de acceso genérico no es realmente una aplicación, sino más bien la base donde se construyen las aplicaciones, su objetivo es ofrecer una manera de establecer y mantener los enlaces seguros entre maestro y esclavo.

El perfil de descubrimiento lo utilizan los dispositivos para descubrir qué servicios ofrecen otros dispositivos. Los perfiles de acceso a LAN, acceso telefónico a redes y fax están destinados a la conectividad. Los tres siguientes están destinados a la telefonía. Los

últimos tres perfiles sirven para intercambiar objetos entre dispositivos inalámbricos, como tarjetas de presentación, imágenes o archivos de datos.

### **2.3.9 Rendimientos y versiones**

Existen varias versiones para cada especificación. La versión 1.0 ofrece un ancho de banda inferior a 1 Mbps para una distancia alrededor de 10 m. La distancia depende de la clase de equipo. Se tienen tres clases y por lo tanto tres potencias de transmisión, están definidos para dispositivos de muy baja potencia, moderada y media, por ejemplo equipos pequeños, teléfonos y tarjetas de computadoras. La Versión 2 ofrece un ancho de banda máximo de 2 a 3 Mbps.

## **2.4 Redes WLAN Wi-Fi**

La IEEE ratificó la especificación 802.11 en 1997. Esta norma, en su primera versión, contó con tasas de datos de 1 y 2 Mbps y definió las reglas fundamentales para la señalización y los servicios inalámbricos. El estándar 802.11 describe sólo la capa física y MAC. El principal problema que limitó el desarrollo inicial en la industria de las WLANs, fue en ese momento el rendimiento, el cual era demasiado bajo para satisfacer las necesidades de varias empresas. Consientes de la necesidad de incrementar esta tasa, la IEEE ha definido a lo largo de los años varias especificaciones.

En 1999 se formó una organización con el objetivo de impulsar la adopción de un estándar universal para la alta velocidad de redes de área local inalámbrica, la Wi-Fi Alliance, hoy en día cuenta con más de 300 empresas miembro, entre ellas hay fabricantes de semiconductores, proveedores de hardware y software para las WLANs. Se pueden encontrar compañías como 3Com, Cisco-Aironet, Apple, Breezecom, Cabletron, Compaq, Dell, Fijitsu, IBM, Intersil, Lucent Technologies, No Wires Needed, Nokia, Samsung, Symbol Technologies, Wayport y Zoom.

### **2.4.1 Arquitectura**

El estándar 802.11 considera dos tipos de componentes: una estación de cliente inalámbrico (en general una PC equipada con una tarjeta de interfaz inalámbrica, NIC) conocida como una estación STA (*station*) y un punto de acceso, AP, o a veces llamados repetidores inalámbricos, que funciona como un puente y un punto de enlace entre la red fija y la red inalámbrica. Este punto de acceso está normalmente compuesto de un radio transmisor-receptor, una tarjeta de red (por ejemplo Ethernet 802.3) y un software que

funciona como puente de la capa 2 conforme con el estándar IEEE 802.11d. El AP se comporta como la estación básica de la red inalámbrica, agregando el acceso de múltiples estaciones inalámbricas a la red fija. Las estaciones inalámbricas incluyen una tarjeta de acceso de red IEEE 802.11 o adaptadores inalámbricos (o controlador de interfaz de red). Estos adaptadores están disponibles en muchas formas PCI, PCMCIA, USB y actualmente en chips Wi-Fi.

El modelo estándar IEEE 802.11 define tres modelos: uno es el de modo de infraestructura, el de modo ad hoc y el modo de malla.

#### **2.4.1.1 Modo Infraestructura.**

En este modo la red inalámbrica consiste de por lo menos un punto de acceso conectado a la infraestructura de la red fija y un conjunto de estaciones de clientes inalámbricos. Esta configuración está basada sobre una arquitectura celular donde el sistema es subdividido en celdas. Cada celda (llamada conjunto de servicios básicos, BSS) en el estándar IEEE 802.11 es controlado por la estación base (llamada AP).

La estación con un BSS ejecuta el mismo protocolo MAC y compite por el acceso al mismo medio inalámbrico compartido. Podemos referirnos a ella como una celda. A pesar de que una WLAN puede estar formada por una sola celda (con un único AP) la distancia máxima entre estaciones está limitada por muchos factores como la potencia de salida de RF y las condiciones de propagación del medio ambiente tanto en interiores como en exteriores. Para proporcionar cobertura en un área extensa, múltiples BSS son usados cuando los AP son conectados a través de un backbone (red troncal) llamado sistema de distribución, DS.

La mayoría de los dispositivos inalámbricos deben ser capaces de llegar a los servicios fijos LAN (servidores de archivos, impresoras y conexiones a internet). El sistema de distribución es responsable de transportar los paquetes entre las celdas dentro de las áreas del conjunto de servicios extendido, ESS. La transferencia de datos que se producen entre las estaciones de un BSS y el DS es a través de un AP. El sistema de distribución maneja la asignación de direcciones y funciones de interoperabilidad, el sistema puede corresponder a una red Ethernet, Token Ring, FDDI o cualquier otra red de comunicaciones como una red inalámbrica IEEE 802.11 punto a punto.

La figura 2.9 muestra una típica LAN IEEE 802.11 incluyendo los dispositivos mencionados anteriormente.

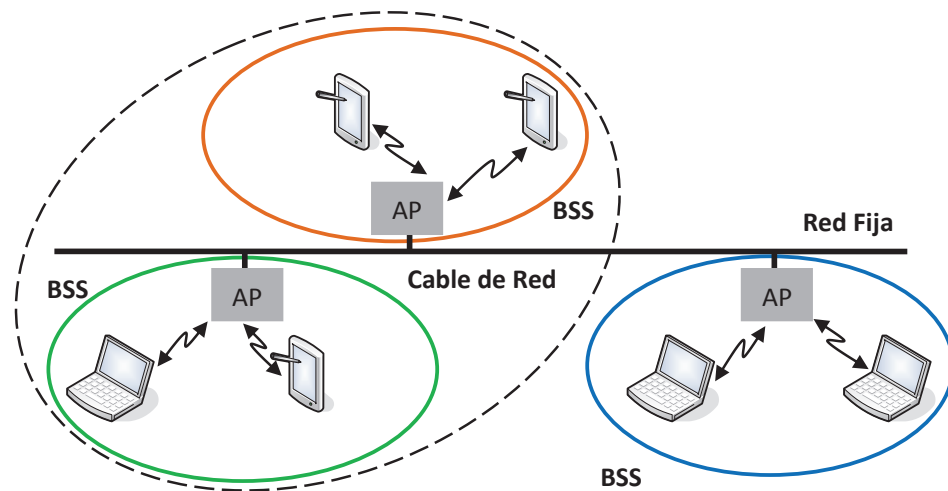


Figura 2.9 Modo de Infraestructura en IEEE 802.11

El estándar define el concepto de “*gateway*” o “puerta de enlace”, éste es un dispositivo que se usa para interconectar una arquitectura IEEE 802.11 con una LAN cableada 802.X. La función del gateway es ofrecer una integración lógica entre arquitecturas WLAN y LANs cableadas existentes. En la mayoría de las implementaciones de hardware, todos los AP se comportan como puertas de enlace. El gateway lógico puede ser implementado en un dispositivo, como un puente, un router o un switch, y es una parte de la WLAN y esta se adjunta al sistema de distribución.

#### **2.4.1.2 Modo ad hoc**

El modo ad hoc (Figura 2.6) representa simplemente un grupo de estaciones inalámbricas IEEE 802.11 que se comunican directamente entre ellos sin tener una conexión con un AP o una conexión a una red fija a través de un DS. Esta configuración algunas veces se refiere a una configuración *peer-to-peer*. Cada estación puede establecer una comunicación con cualquier otra estación en la celda que es llamada una celda independiente del conjunto de servicios básicos independientes, IBSS. Al igual que en el modo de infraestructura, una red ad hoc también se identifica por un identificador SSID.

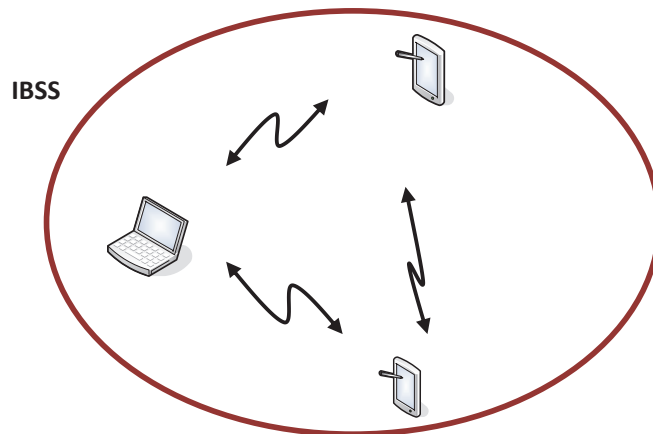


Figura 2.10 Modo ad hoc

Este modo permite crear de manera rápida y simple una red inalámbrica donde esta no se fija a la infraestructura o donde tal infraestructura no es necesaria para los servicios requeridos (por ejemplo la habitación de un hotel, centros de conferencias o el aeropuerto) o finalmente cuando el acceso a la red es difícil o está prohibido.

Las redes inalámbricas ad hoc han surgido como una categoría de redes inalámbricas que utilizan relevadores de radio multisalto y son capaces de operar en una manera de auto-organización y autoconfiguración sin el soporte de una infraestructura fija. El principio detrás de las redes ad hoc es la retransmisión multisalto que fue estudiado en el pasado bajo el nombre de PRNET en relación a la investigación militar llevada por la Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA, a principios de 1970.

### **2.4.1.3 Modo de malla**

Define una configuración híbrida que combina modo de infraestructura y modo ad hoc. Recientemente, las redes inalámbricas híbridas han surgido como una solución prometedora, permitiendo a los usuarios móviles lograr acceso a los servicios de una manera continua independientemente de su distribución en el área de comunicación. En una red inalámbrica híbrida cualquier nodo móvil puede tener conectividad ya sea directamente o a través de un nodo de puerta de enlace a una red de infraestructura. Esta última red puede ser una red IP, una red inalámbrica 3G de área amplia (WAWN) o una WLAN IEEE 802.11. Por otra parte, las redes híbridas inalámbricas pueden integrar tecnologías similares o heterogéneas donde cada nodo móvil se mueve entre ellos a manera de sobre demanda. Un caso especial de esta configuración híbrida puede ser una red de malla WLAN que combina las arquitecturas de infraestructura y ad hoc. Las organizaciones de normas son activamente convocadas para la creación de las especificaciones de redes de malla, como por ejemplo IEEE 802.11, IEEE 802.15, IEEE 802.16 y IEEE 802.20.

Hoy en día en la mayoría de las implementaciones WLAN hay una distinción clara entre los dispositivos que comprenden la infraestructura de la red y los dispositivos que son clientes los cuales simplemente usan la infraestructura para obtener acceso a los recursos de red. Los dispositivos con infraestructura WLAN más comunes hoy en día son los AP con estándares IEEE 802.11 que proporcionan una variedad de servicios. Los AP por lo general están directamente conectados a una red por cable (por ejemplo IEEE 802.3) y simplemente proporcionar conectividad inalámbrica a los dispositivos cliente en lugar de utilizar conectividad inalámbrica para si mismos. Los dispositivos cliente, por otra parte, son típicamente implementados como simples STAs IEEE 802.11 los cuales se asocian

con un AP con el fin de obtener acceso a la red. Estos simples STAs son dependientes de un AP, con las que se asocian para comunicarse.

Basado en definiciones IEEE 802.11s, una arquitectura típica de malla de nodos inalámbricos se divide en dos grandes clases: nodos de malla, son nodos capaces de soportar los servicios de malla, y los nodos no malla, que incluyen STAs de cliente simple. Los nodos de clase malla pueden soportar servicios de AP y lograr ser administrados o no administrados. Una topología de red WLAN de malla puede incluir puntos de malla (MPs, *mesh points*) con una o más interfaces de radio y puede utilizar uno o más canales de comunicación entre MPs.

Un ejemplo de WiFi de malla está ilustrado en la Figura 2.11. Algunos dispositivos que soportan servicios de malla son MPs. Note que un MP puede ser un dispositivo de infraestructura dedicada o un dispositivo de usuario que es capaz de participar plenamente en la formación y operación de la red de malla. Un tipo especial de MP es el punto de acceso de malla, MAP, que provee servicios de AP además de servicios simples de malla. Una simple STA no participa en un servicio de WLAN de malla como la selección de trayectoria y reenvío.

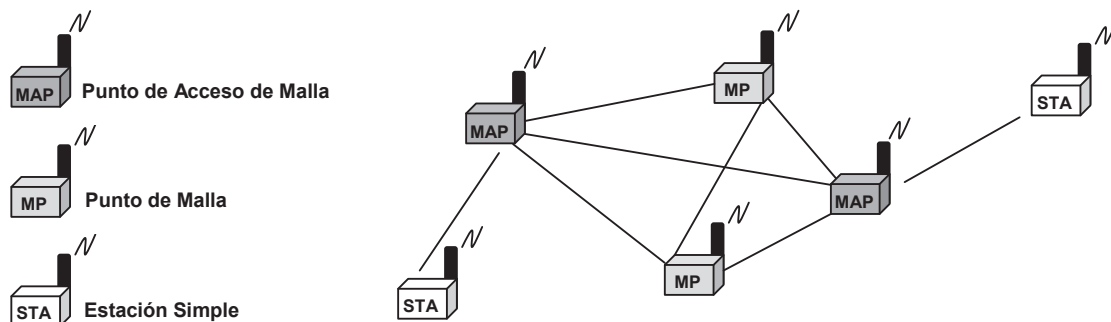


Figura 2.11 WLAN de malla que contiene MPs, MAPs y STAs

Por lo tanto, en principio, un simple dispositivo puede desempeñar los roles tanto de un MP y AP o los roles de un MP y un comisionado a STA. Estas redes hacen uso de la capa 2 de selección de trayectoria de malla y de reenvío.

Las redes inalámbricas de malla (WMNs) infraestructura/troncales son las configuraciones más usadas comúnmente. Un ejemplo se muestra en la Figura 2.12.

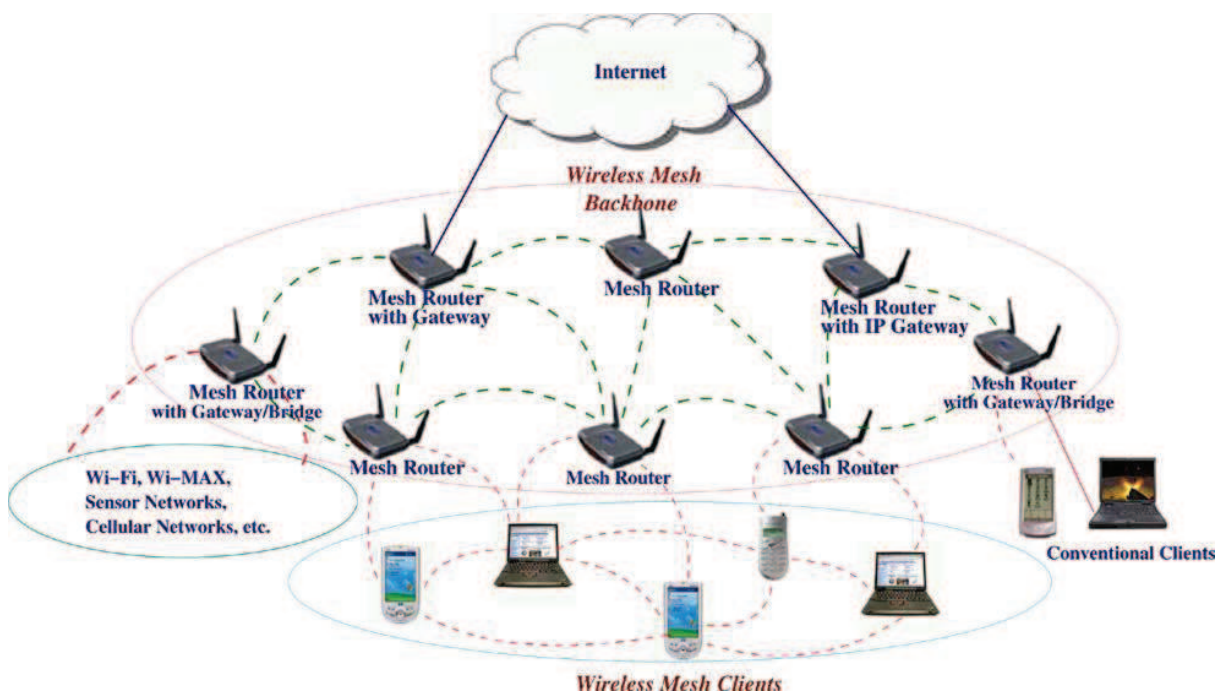


Figura 2.12 Configuración de red inalámbrica infraestructura/troncales. [6]

Las principales ventajas de este tipo de configuración son:

- Incremento de rango, cobertura y flexibilidad en el uso (comparado con el estándar básico)
- Funcionamiento confiable

- Sin fisuras de seguridad
- Transporte multimedia entre dispositivos
- Operación eficiente de energía para la operación de batería de los dispositivos
- Compatibilidad con versiones anteriores
- Garantía de interoperabilidad para el funcionamiento interno
- Posibilidad de un mayor rendimiento
- Densidad de extensión de soporte
- Robustez
- Dinámica de auto organización
- Auto configuración y auto sanación para permitir integración flexible
- Rápida implementación
- Fácil mantenimiento
- Bajo costo
- Alta escalabilidad y servicios confiables
- Aumento de la capacidad de red

Las redes de malla también tienen desventajas potenciales importantes. En particular el consumo de energía y seguridad son problemas típicos de tales topologías de red. Además cualquier implementación de una red de malla no puede asumir que todos los dispositivos usen este nuevo protocolo.

WMN es un tema muy nuevo y se cree una tecnología prometedora desempeñando un papel cada vez más importante en la futura generación de redes inalámbricas móviles.

## 2.4.2 Tipos y bandas de frecuencia

Hasta ahora, la familia de normas IEEE 802.11 continuamente tiene nuevas propuestas, a continuación se ofrece una lista de normas y grupos de tarea que existen dentro del grupo de trabajo.

1. IEEE 802.11: el original con 1 y 2 Mbps, opera en la banda ISM de 2.4 GHz y estándar de infrarrojo, IR, 1999, FHSS y DSSS.
2. IEEE 802.11b: mejoras de IEEE 802.11 para soportar 5.5 y 11 Mbps, 1999.
3. IEEE 802.11a: éste estándar opera en la banda de 5 GHz y permite rendimientos de 6 a 54 Mbps.
4. IEEE 802.11g: permite alcanzar mayores tasas de datos, 54 Mbps, opera en la banda de 2.4 GHz. Usa modulación de multiplexaje ortogonal por división de frecuencia, OFDM. Proporciona compatibilidad con 802.11b (2003).
5. IEEE 802.11d: internacional (de país a país) extensiones de roaming, comunica información por puntos de acceso (APs) sobre canales de radio disponibles y niveles aceptables de potencia de acuerdo a las restricciones legales de cada país.
6. IEEE 802.11c: opera como puente, incluido el estándar 802.1D, 2003.
7. IEEE 802.11e: contiene mejoras, 2005, es un estándar para la calidad de servicio (QoS), define las especificaciones de los mecanismos QoS para soportar aplicaciones multimedia. Aplicado a IEEE 802.11a/b/g. Se introduce la función de coordinación híbrida (*hybrid coordination function, HCF*), ésta utiliza tanto un método de canal de acceso basado en contención, llamado el canal de acceso de mayor distribución (EDCA) y un método de canal de acceso libre de contención, llamado canal de acceso controlado por HCF (HCCA).

8. IEEE 802.11F: se ocupa de la normalización de protocolos entre APs para permitir el uso de una infraestructura de múltiples proveedores para evitar las normas de propiedad. El protocolo de *Inter-Access Point* ofrece esta característica de interoperabilidad.
9. IEEE 802.11h: administra el espectro IEEE 802.91a (5 GHz) para la compatibilidad Europea, 2004. Son considerados mecanismos de selección dinámica de frecuencia y control de transmisión de potencia.
10. IEEE 802.11i: contiene mayor seguridad, 2004. Aplica a los estándares IEEE 802.11 a/b/g.
11. El estándar IEEE 802.11X: proporciona los mecanismos de seguridad para varios medios incluyendo enlaces inalámbricos por los medio de fuertes procedimientos de autenticación con distribución dinámica de claves.
12. IEEE 802.11j: convergencia de los estándares americano y japonés (IEEE 802.11), esta es una adaptación de la primera legislación japonesa.
13. IEEE 802.11k: mejoras en la medición de recursos de radio RRM, este define métodos y criterios de medición necesarios para los protocolos de capa superior para cumplir con las funciones de administración y mantenimiento.
14. IEEE 802.11n: grandes mejoras en el rendimiento, ofrece alta tasa de datos (108 a 600 Mbps) en las bandas de 2.4 y 5 GHz.
15. IEEE 802.11p: acceso inalámbrico para el ambiente vehicular (*wireless access for the vehicular environment, WAVE*).
16. IEEE 802.11r: roaming rápido.
17. IEEE 802.11s: creación de redes de malla.

18. IEEE 802.11T: predicción de desempeño inalámbrico (*wireless performance prediction, WWP*), métodos de pruebas y métricas.
19. IEEE 802.11u: interconexión con redes que no son 802, por ejemplo teléfonos móviles.
20. IEEE 802.11v: administración de red inalámbrica.
21. IEEE 802.11w: tramas protegidas de administración.
22. IEEE 802.11y: 3650-3700, operación en los Estados Unidos.

### **2.4.3 Diferentes capas físicas**

Varios tipos de interfaces de radio pueden ser soportados por la referencia de la arquitectura IEEE 802.11. Tres diferentes capas físicas son definidas en el estándar básico:

- Una capa de radio física usa una técnica de operación FHSS en la banda ISM, 2.4 GHz.
- Una capa física de radio usa una técnica DSSS, opera en la banda ISM 2.4 GHz.
- Una capa física para la transmisión infrarrojo, IR. Por supuesto, nunca ha sido un producto comercial para tal elección física.

Las transmisiones banda base con la técnica de espectro disperso permite incrementar el rendimiento para reducir al mínimo los efectos dañinos de la propagación multitrayectoria, interferencia y ruido.

Para IEEE 802.11, Wi-Fi (IEEE 802.11b) e IEEE 802.11g, la banda de frecuencia usada es una banda sin licencia, ISM, en torno a 2.4 GHz, el ancho de banda disponible es de 83 MHz. Para los sistemas basados en IEEE 802.11a un mayor ancho de banda está disponible aproximadamente igual a 455 MHz en la banda de 5 GHz, ésta banda es sin licencia pero proporciona un límite superior en la potencia de transmisión generalmente limitada a 100m Watt.

La capa física se estructura en dos subcapas:

- La subcapa de convergencia.
- La subcapa dependiente del medio de transmisión en sí: medio físico dependiente, PMD.

La parte alta es llamada subcapa de convergencia o *Physical Layer Convergence Sublayer Procedure*, PLCP. El propósito de esta capa es para adaptarse a la subcapa inferior que es dependiente del medio (OFDM, IR, DSSS o FHSS). Esta capa tiene como función insertar las cabeceras necesarias para la sincronización o la identificación de la modulación usada en el medio. También permite seleccionar la mejor antena para captar la señal (en el caso de un AP usa la técnica de diversidad de antenas y MIMO). Las tramas enviadas por la capa de convergencia son llamadas Protocol Data Links PLCP, PPDU. El formato del PPDU depende de la subcapa más baja utilizada

### 2.4.4 Descripción de estructura de subcapas

Se concentra en las dos subcapas más bajas del modelo OSI, la capa física, PHY,x y una capa de enlace de datos que contiene la subcapa MAC y LLC, Logical Link Control, como se muestra en la Figura 2.13.

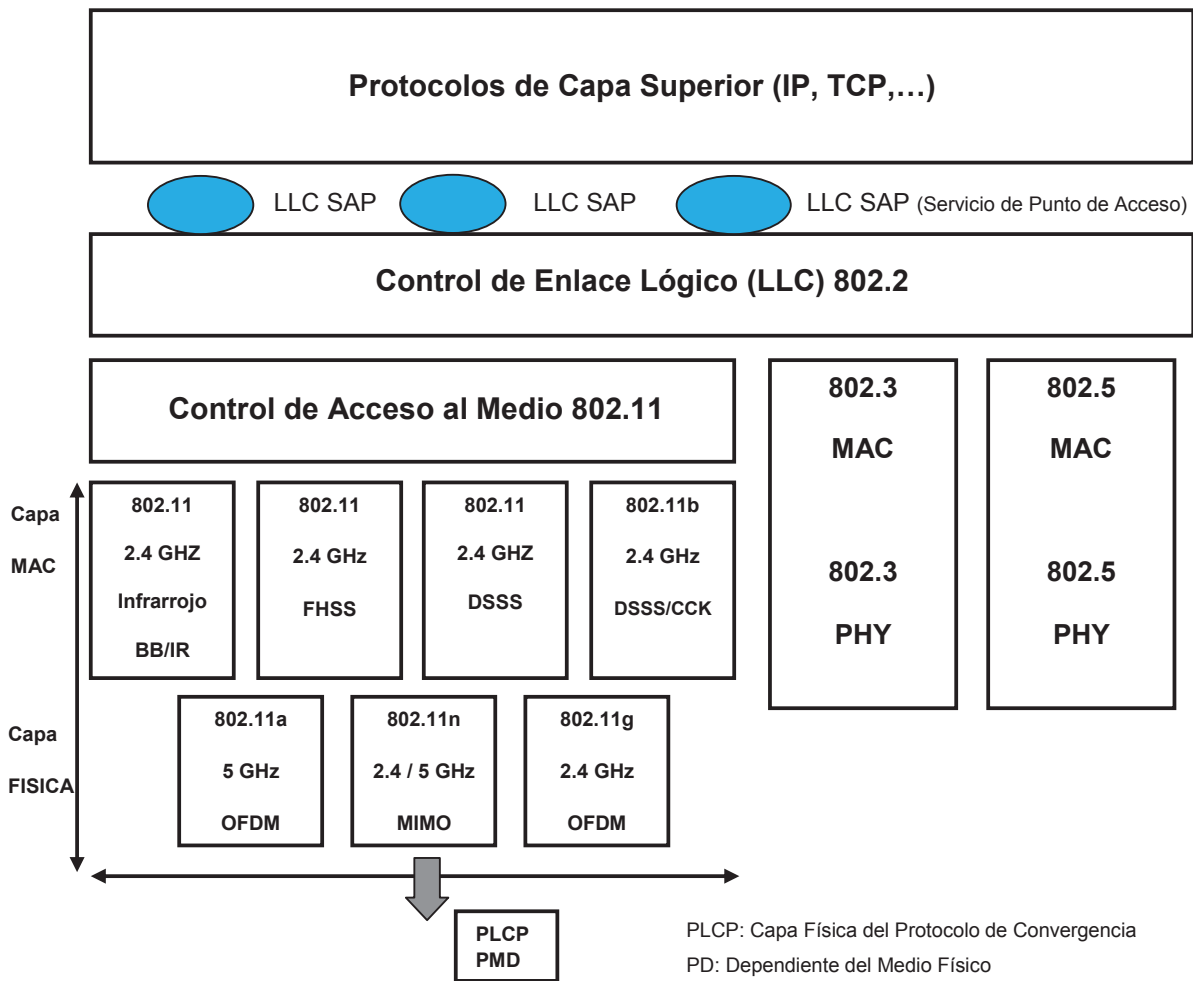


Figura 2.13 Familia IEEE 802 y 802.11: modelo de referencia OSI

La capa física, que se encarga de la transmisión de las tramas MAC en el medio inalámbrico, usa varias técnicas de modulación y codificación binaria.

La capa MAC se describe por la presentación de sus diferentes funciones (asociación, fragmentación, control de acceso, seguridad, etc.) así como las estructuras de tramas de la MAC 802.11. El estándar IEEE 802 define las mismas subcapas superiores de enlace de datos para todas las LANs, esta actúa como una subcapa LLC 802.2. El estándar 802.11 por lo tanto describe sólo la capa física y MAC.

#### **2.4.5 Servicios Básicos**

La arquitectura IEEE 802.11 soporta una serie de servicios básicos como son:

- Asociación / Disociación / Reasociación
- Distribución de las tramas MAC/MSDU
- Autenticación/ Desautenticación
- Difusión y broadcast
- Beacon y sondeo
- Privacidad y confidencialidad
- Capas superiores sincronizadas por reloj y Planificación de QoS de tráfico
- Ajustes de radio

## Referencias

[1] OECD (2006), "The Implications of WiMAX for Competition and Regulation", *OECD Digital Economy Papers*, No. 108, OECD Publishing.  
<http://dx.doi.org/10.1787/231618416012>  
<http://www.oecd-ilibrary.org/docserver/download/fulltext/5kz98hwjzh7j.pdf?expires=1340736762&id=id&accname=quest&checksum=9C7DB75F684BE40FE4E9DFAA7084F345>

[2] Shahin Farahani, *ZigBee Wireless Networks and Transceivers*, Newnes, 2008, pag 3.

[3] IEEE 802.15.4<sup>TM</sup>-2006: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs), 2006, pag. 1.

[4] IEEE 802.15.3<sup>TM</sup>-2003: Wireless medium Access Control (MAC) and physical Layer (PHY) Specifications for High Rate Wireless Personal Area Network (WPANs), 2003, pag. 1.

[5] Tanenbaum, Andrew S., *Redes de Computadoras*, PEARSON EDUCACIÓN, México, 2003, cuarta edición.

[6] Ian F. Akyildiz, Xudong Wang, Weilin Wang, *Wireless mesh networks: a survey*, Elsevier, USA, 2005, pag. 449.

Houda Labiod, Hossam Afifi, Costantino De Santis, *Wi-Fi<sup>TM</sup>, Bluetooth<sup>TM</sup>, ZigBee<sup>TM</sup> and WiMax<sup>TM</sup>*, Published by Springer, Dordrecht, 2007.

Aura Ganz, Zvi Ganz, Kitti Wongthavarawat, *Multimedia Wireless Networks: Technologies, Standards, and QoS*, Publisher Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2003.

Joaquín Andreu Gómez, *Servicios en Red*, Editorial EDITEX, S. A., Madrid.

### ZigBee

En 1997 ocho empresas promotoras forman la ZigBee Alliance con el objetivo de “hacer posible productos de monitoreo y control, confiables, rentables y de bajo consumo, interconectados mediante una red inalámbrica basándose en un estándar global abierto”.

[1] Establecida en el 2002, la ZigBee Alliance es una asociación abierta, sin fines de lucro. Cualquier persona puede unirse, sus miembros están compuestos por empresas, universidades y agencias gubernamentales alrededor de todo el mundo [2].

#### 3.1 Características

ZigBee es un estándar que define un conjunto de protocolos de comunicación de redes inalámbricas de baja tasa de datos de corto alcance [3]. Está dirigido principalmente para realizar aplicaciones sólo con la potencia de la batería, donde la baja tasa de datos, el bajo costo y la batería de larga duración son los principales requisitos.

El estándar de redes inalámbricas de ZigBee se encuentra en un mercado que no es cubierto por otras tecnologías inalámbricas, ver Figura 3.1. La mayoría de los estándares

inalámbricos tratan de conseguir altas velocidades de datos, ZigBee tiene como objetivo cubrir las bajas tasas de datos, ya que está enfocado al control y al monitoreo inalámbrico. Mientras que otras tecnologías inalámbricas están diseñadas para ejecutarse durante horas o quizás días, con las mismas baterías, ZigBee está diseñado para funcionar durante años.

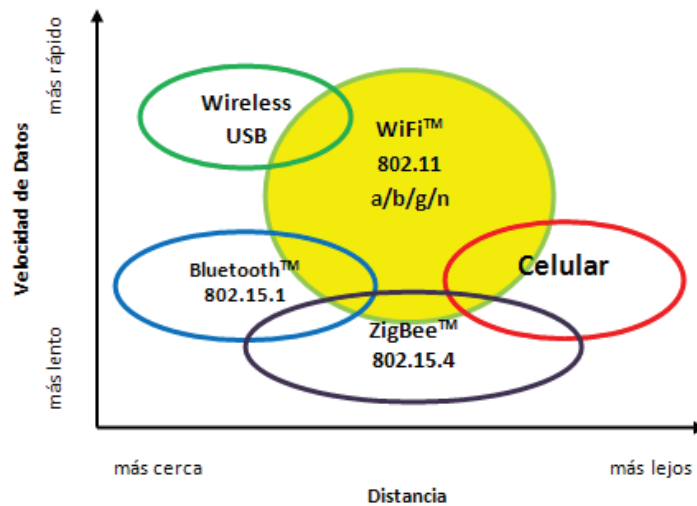


Figura 3.1 Comparación de Tecnologías Inalámbricas

En el mercado de control inalámbrico, ZigBee es ideal para una serie de necesidades específicas ya que:

- Es muy confiable
- Rentable
- Capaz de alcanzar una muy baja potencia
- Muy seguro y
- Cuenta con un estándar global abierto

### 3.2 Arquitectura

La formación de la red es gestionada por la capa de red de ZigBee. La red debe estar en una de las dos topologías de red especificadas por la IEEE 802.15.4: estrella y de igual a igual (*peer-to-peer*).

#### 3.2.1 Topología de Estrella

En la topología en estrella, cada dispositivo en la red sólo puede comunicarse con el Coordinador de la Red de Área Personal (PAN), ver Figura 3.2. Un escenario típico en la formación de una red estrella es que un Dispositivo de Funciones Completas (FFD) es programado para ser un coordinador PAN, éste se activa y empieza a establecer su red. Lo primero que hace el coordinador de la PAN es seleccionar un único identificador PAN que no es utilizado por ningún otro en la red en su radio de campo de influencia, esta es la región alrededor del dispositivo en que sus radios se pueden comunicar con éxito con otros radios. En otras palabras, asegurar que el identificador de la PAN no sea usado por algún otro en la red.

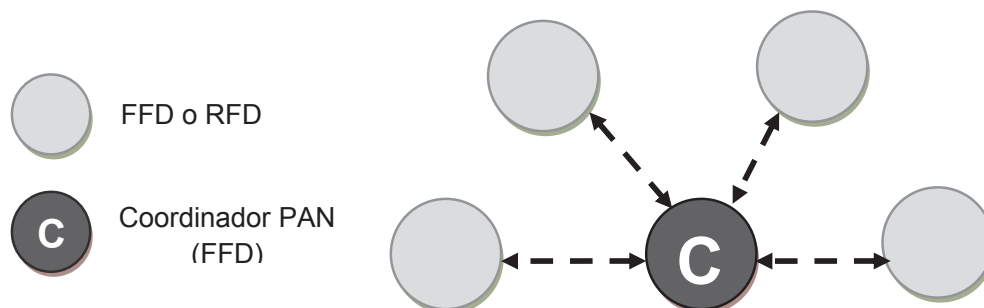


Figura 3.2 Topología de estrella

### 3.2.2 Topología de Malla

En la topología *peer-to-peer*, cada dispositivo puede comunicarse directamente con cualquier otro dispositivo siempre y cuando los dispositivos estén colocados lo suficientemente cerca para establecer un enlace de comunicación exitosa, ver Figura 3.3. Cualquier FFD en una red *peer-to-peer* puede desempeñar el rol de coordinador de la PAN. Una manera de decidir que dispositivo será el coordinador de la PAN es escoger el primer dispositivo FFD para que inicie la comunicación como el coordinador de la PAN. En una red *peer-to-peer*, todos los dispositivos que participan en la retransmisión de mensajes son los FFDs ya que los dispositivos de funciones reducidas (RFDs) no son capaces de retransmitir los mensajes. Sin embargo, un RFD puede ser parte de la red y comunicarse sólo con un dispositivo en particular (un coordinador o un router) en la red.

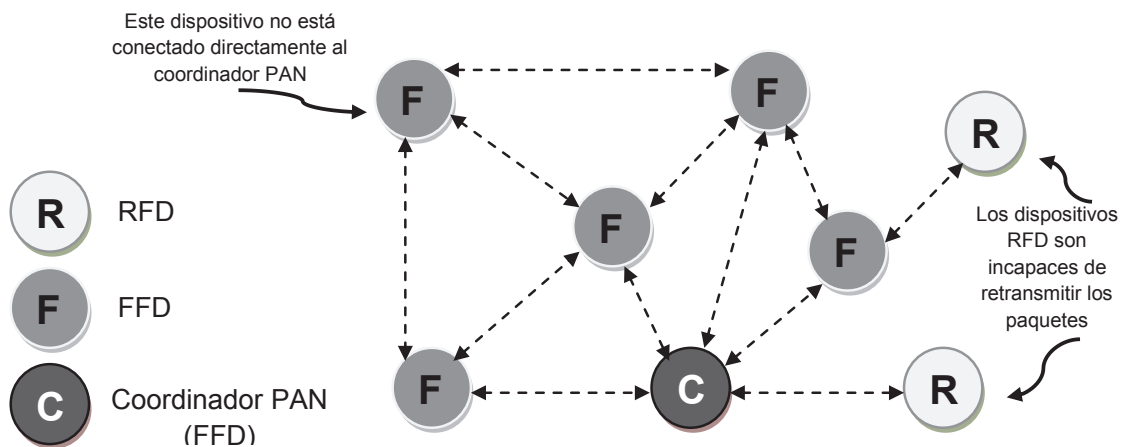


Figura 3.3 Topología de Malla

Una red *peer-to-peer* puede tomar diferentes formas esto depende de la restricción que se hayan definido en cada dispositivo recordemos que no todos pueden comunicarse entre sí. Si no hay ninguna restricción la red *peer-to-peer* es conocida como topología de malla.

### **3.2.3 Topología de Árbol**

Otra forma de red *peer-to-peer* que soporta ZigBee es una topología de árbol. En este caso, el coordinador ZigBee (coordinador PAN) establece la red inicial, los routers de ZigBee forman las ramas y transmiten los mensajes, los dispositivos finales de ZigBee actúan como hojas del árbol y no participan en el enrutamiento del mensaje, ver Figura 3.4. Los routers de ZigBee pueden crecer en la red más allá de la red inicial establecida por el coordinador de ZigBee.

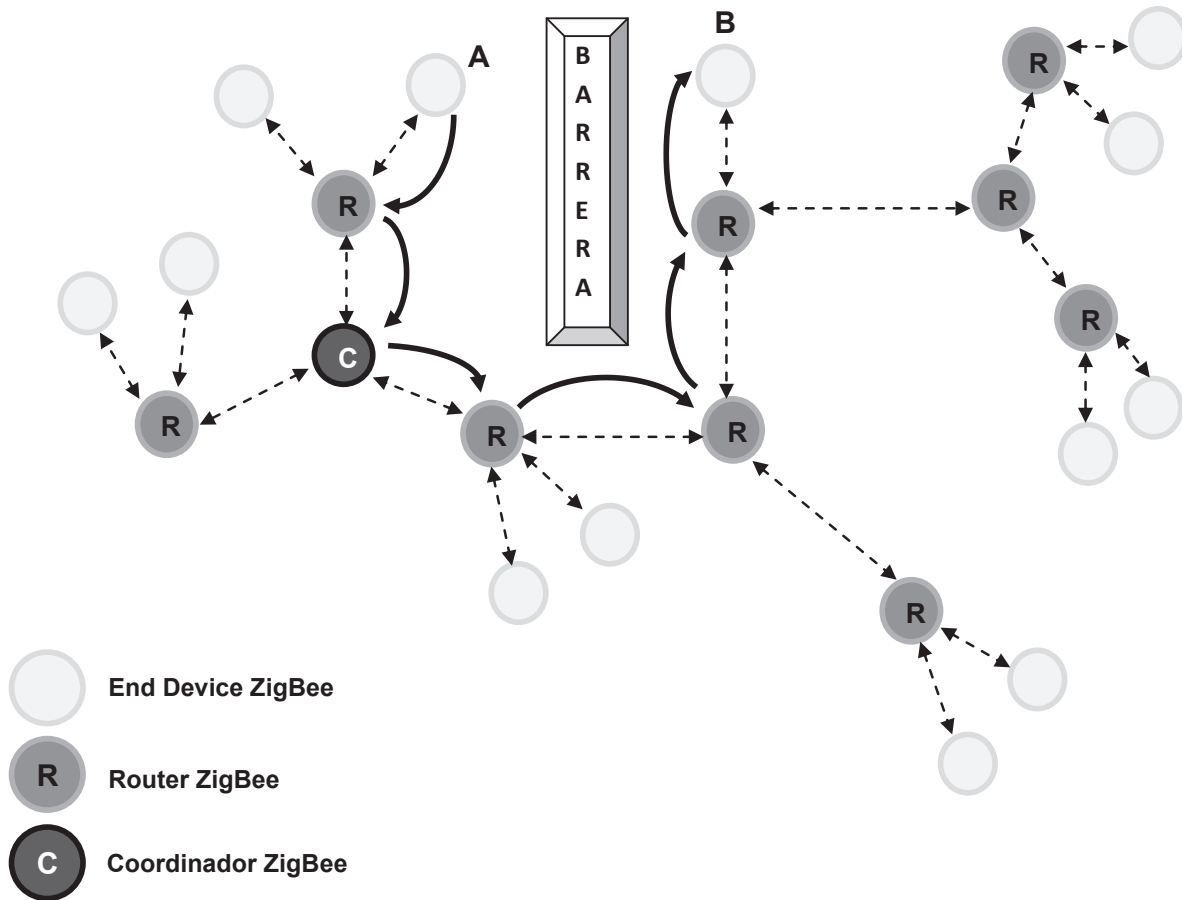


Figura 3.4 Una Topología de Árbol ZigBee

La figura 3.4 también muestra un ejemplo de cómo en la retransmisión de un mensaje se puede ayudar a ampliar la distancia de la red o rodear incluso las barreras. Por ejemplo, el dispositivo A necesita enviar un mensaje al dispositivo B, pero hay una barrera entre ellos que es difícil de atravesar para la señal. La topología de árbol ayuda a retransmitir el mensaje alrededor de la barrera y llegar al dispositivo B. A veces esto se conoce como multisalto, ya que un mensaje salta de un nodo a otro hasta que alcanza su destino. Esta alta cobertura se produce a expensas del alto potencial de la latencia del mensaje.

Una red IEEE 802.15.4, independientemente de su topología, siempre se crea un coordinador PAN. El coordinador de la PAN controla la red y realiza los deberes mínimos siguientes:

- Asigna una dirección única (16 bits o 64 bits) a cada dispositivo en la red.
- Inicializa, termina y enruta los mensajes a través de la red.
- Selecciona un único identificador PAN para la red. Este identificador PAN permite a los dispositivos dentro de la red usar los 16 bits, un método corto de direccionamiento, y aun así ser capaces de comunicarse con otros dispositivos a través de redes independientes.

Sólo hay un coordinador PAN dentro de la red. Un coordinador PAN puede necesitar largos periodos de actividad, por lo que suele conectarse a una red eléctrica en lugar de una batería. Todo los demás dispositivos normalmente se alimentan con baterías. La red más pequeña posible incluye dos dispositivos: un coordinador PAN y un dispositivo.

### **3.3 Relación entre ZigBee y el estándar IEEE 802.15.4**

Una de las formas más comunes para establecer una red de comunicación (por cable o inalámbrica) es utilizar el concepto de capas de red. Cada capa es responsable de ciertas funciones en la red. Las capas normalmente pasan los datos y comandos sólo a las capas directamente por encima o por debajo de ellas.

Las capas del protocolo de la red inalámbrica de ZigBee se muestran en la Figura 3.5. Estas capas están basadas en el modelo básico de referencia OSI. Como se muestra en la figura 3.5 las dos capas inferiores están definidas por el estándar IEEE 802.15.4 el cual

define las especificaciones para la Capa Física, PHY, y la Capa de Control de Acceso al Medio, MAC, pero no especifica los requisitos de las capas superiores.

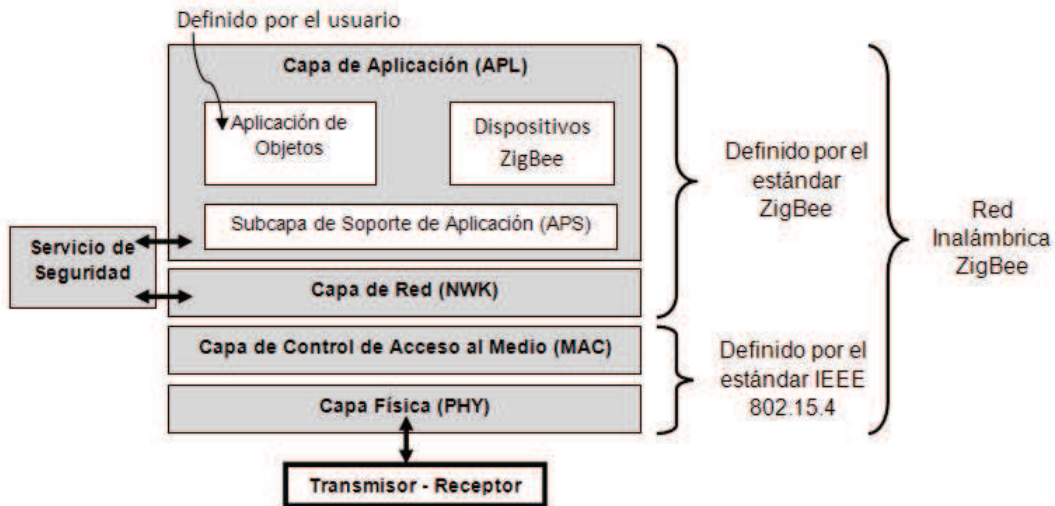


Figura 3.5 Protocolos de Capas de Red Inalámbrica ZigBee

El estándar ZigBee sólo define los protocolos de capas de red, aplicación y niveles de seguridad, y adopta las capas IEEE 802.15.4 PHY y MAC como parte del protocolo de red ZigBee. Por lo tanto, así cualquier dispositivo compatible con ZigBee se ajusta al estándar IEEE 802.15.4.

### 3.4 Frecuencia de Operación y Tasa de datos

Hay tres bandas de frecuencia en la última versión del estándar IEEE 802.15.4, publicado en septiembre de 2006:

- 868 – 868.6 MHz (banda 868 MHz)
- 902 – 928 MHz (banda 915 MHz)
- 2400 – 2483.5 MHz (banda 2.4 GHz)

La banda de 868 MHz es utilizada en Europa para una serie de aplicaciones, incluyendo el de redes inalámbricas de corto alcance. Las bandas 915 MHz y 2.4 GHz son parte de las bandas de frecuencia industrial, científica y médica (ISM). La banda de 915 MHz se utiliza principalmente en América del Norte, mientras que la banda de 2.4 GHz se utiliza en todo el mundo.

La tabla 3.1 proporciona más detalles sobre la manera en que estas tres bandas de frecuencia se utilizan en el estándar IEEE 802.15.4. Si un transceptor soporta la banda de 868 MHz, también debe soportar la banda de 915 MHz, y viceversa. Por lo tanto, estas dos bandas son siempre agrupadas como 868/915 MHz.

	Frecuencia (MHz)	Número de Canales	Modulación	Tasa de Chips (Kchip/s)	Tasa de Bit (Kb/s)	Tasa de Símbolo (Ksímbolo/s)	Método de Dispersión
	868-868.6	1	BPSK	300	20	20	DSSS Binario
	902-928	10	BPSK	600	40	40	DSSS Binario
Opcional	868-868.6	1	ASK	400	250	12.5	PSSS 20-bit
	902-928	10	ASK	1600	250	50	PSSS 5-bit
Opcional	868-868.6	1	O-QPSK	400	100	25	16 series Ortogonal
	902-928	10	O-QPSK	1000	250	62.5	16 series Ortogonal
	2400-2483.5	16	O-QPSK	2000	250	62.5	16 series Ortogonal

**Tabla 3.1 Tasas de Datos y Frecuencias de Operación IEEE 802.15.4**

### 3.5 Comunicación Básica IEEE 802.15.4 y ZigBee

En esta sección se revisan algunos conceptos básicos de comunicación como son: método de acceso múltiple, método de transferencia de datos y direccionamiento IEEE 802.15.4 y ZigBee.

#### 3.5.1 CSMA-CA

IEEE 802.15.4 implementa un método simple para permitir a múltiples dispositivos utilizar el mismo canal de frecuencia. El mecanismo de acceso al canal utilizado es un Acceso Múltiple por Detección de Portadora Anticolisión, *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*, CSMA-CA. En CSMA-CA, en cualquier momento que un dispositivo desea transmitir, primero realiza una evaluación de canal despejado, *clear channel assessment*, CCA, para asegurar que el canal no está siendo utilizado por otro dispositivo. Después el dispositivo comienza a transmitir su propia señal. La decisión de declarar un canal despejado o no, se puede basar en medir la energía espectral en el canal de frecuencia de interés o detectar el tipo de ocupación de la señal.

Cuando un dispositivo planea transmitir una señal, primero entra en modo de recepción para detectar y estimar el nivel de energía de la señal en el canal deseado. Esta tarea se conoce como detector de energía, *energy detection*, ED. En ED el receptor no trata de decodificar la señal, solo estimar el nivel de energía de la señal. Si hay una señal en la banda de interés, ED no determina si es o no es una señal IEEE 802.15.4.

Si el canal no está libre, el dispositivo desiste por un periodo de tiempo aleatorio y vuelve a intentarlo, esto se repite hasta que el canal queda libre o el dispositivo alcanza el máximo número de intentos definidos por el usuario.

### **3.5.2 Redes con Beacon Habilitado vs Sin Beacon**

Hay dos métodos para acceder a los canales: basado en contención o sin contención. En un canal de acceso basado en contención todos los dispositivos que desean transmitir en el mismo canal de frecuencia usan el mecanismo CSMA-CA y el primero que encuentra el canal libre empieza a transmitir. En el método basado en sin contención, el coordinador PAN dedica una ranura de tiempo específica para un dispositivo en particular. Esto se llama ranura de tiempo garantizada, *guaranteed time slot*, GTS. Por lo tanto, un dispositivo con un GTS asignado empezará a transmitir durante ese GTS sin necesidad de usar el mecanismo CSMA-CA.

Para proporcionar un GTS, el coordinador PAN necesita asegurarse que todos los dispositivos en la red están sincronizados. Beacon es un mensaje con formato específico que se usa para sincronizar los relojes de los nodos de la red. Un coordinador tiene la opción de transmitir señales beacon para sincronizar los dispositivos conectados a él, a esto se llama PAN con beacon habilitado. La desventaja de usar el beacon es que todos los dispositivos en la red deben despertar de manera regular para escuchar el beacon, sincronizar sus relojes y regresar a dormir. Esto significa que muchos dispositivos de la red pueden despertar sólo para la sincronización y no realizar ninguna otra tarea mientras están activos, por lo tanto la vida de la batería de un dispositivo en la red con beacon habilitado es normalmente menor que en una red sin beacon.

Una red en la que el coordinador PAN no transmite beacon se conoce como una red sin beacon. Una red sin beacon no puede tener GTS y tampoco periodos sin contención porque los dispositivos no pueden ser sincronizados unos con otros. El tiempo de vida de las baterías en redes sin beacon puede ser notablemente mejor que una red con beacon habilitado, ya que los dispositivos despiertan con menor frecuencia.

### **3.5.3 Método de Transferencia de Datos**

Hay tres tipos de transferencia de datos IEEE 802.15.4:

- Transferencia de datos de un dispositivo a un coordinador
- Transferencia de datos de un coordinador a un dispositivo
- Transferencia de datos entre dispositivos iguales

Los tres métodos se pueden usar en una topología *peer-to-peer*. En una topología estrella, sólo los dos primeros se utilizan, porque no está permitida la comunicación directa *peer-to-peer*.

### **3.5.4 Direccionamiento**

Cada dispositivo en la red necesita una dirección única. IEEE 802.15.4 utiliza dos métodos de direccionamiento:

- 16 bits para direccionamiento corto
- 64 bits para direccionamiento extendido

Una red puede elegir usar cualquiera de los dos direccionamientos. El direccionamiento corto permite la comunicación con una sola red, una reducción en la longitud de los mensajes y ahorro de espacio de memoria necesario para almacenar las direcciones asignadas. La combinación de un identificador único y un direccionamiento corto pueden usarse para la comunicación entre redes independientes.

Disponer de un direccionamiento de 64 bits significa que el número máximo de dispositivos en la red puede ser de  $2^{64}$  o aproximadamente de  $1.8 \times 10^{19}$ . Por lo tanto una red inalámbrica IEEE 802.15.4 es prácticamente ilimitada en el número de dispositivos que pueden ingresar a la red.

La capa de red (NWK) del protocolo ZigBee asigna una dirección NWK de 16 bits además de la dirección IEEE. Una tabla de búsqueda simple se usa para asignar cada dirección IEEE de 64 bit a una dirección única NWK. Las transacciones de capa NWK requieren el uso de la dirección NWK.

Cada uno de los radios en la red puede tener una única dirección IEEE y una sola dirección NWK. Pero puede haber hasta 240 dispositivos conectados a un solo radio. Cada uno de estos dispositivos se distingue por un número entre 1 y 240 conocido como la dirección de extremo.

### **3.6 Roles y Tipos de dispositivos**

Hay dos tipos de dispositivos en una red inalámbrica IEEE 802.15.4, los dispositivos con funciones completas (FFD, *full-function devices*) y dispositivos con funciones reducidas (RFD, *reduced-function devices*). Un FFD es capaz de realizar todas las funciones

descritas en el estándar IEEE 802.15.4 y puede tomar cualquier rol en la red. Un RFD, por otra parte, está limitado en capacidades. Por ejemplo, un FFD puede comunicarse con cualquier otro dispositivo en la red, pero un RFD solamente puede hablar con un dispositivo FFD. Los dispositivos RFD están destinados a aplicaciones muy simples, como encender o apagar un interruptor. El consumo de potencia de procesamiento y el tamaño de la memoria de los dispositivos RFD son normalmente menores a los de los dispositivos FFD.

En una red IEEE 802.15.4, un dispositivo FFD puede tomar tres diferentes roles: coordinador, coordinador PAN y dispositivo. El coordinador es un dispositivo FFD que es capaz de transmitir mensajes. Si el coordinador es también el controlador principal de una red de área personal, es llamado coordinador PAN. Si el dispositivo no actúa como coordinador, se llama simplemente dispositivo.

El estándar ZigBee utiliza una terminología ligeramente diferente, ver figura 3.6. Un coordinador de ZigBee es un coordinador PAN del estándar IEEE 802.15.4. Un router ZigBee es un dispositivo que puede actuar como coordinador IEEE 802.15.4. Finalmente, un dispositivo final, *end device* ZigBee es un dispositivo que no es ni coordinador ni router; éste dispositivo tiene menores características, menor tamaño de memoria y menor capacidad de procesamiento. Un dispositivo final, es normalmente el dispositivo más barato en la red.

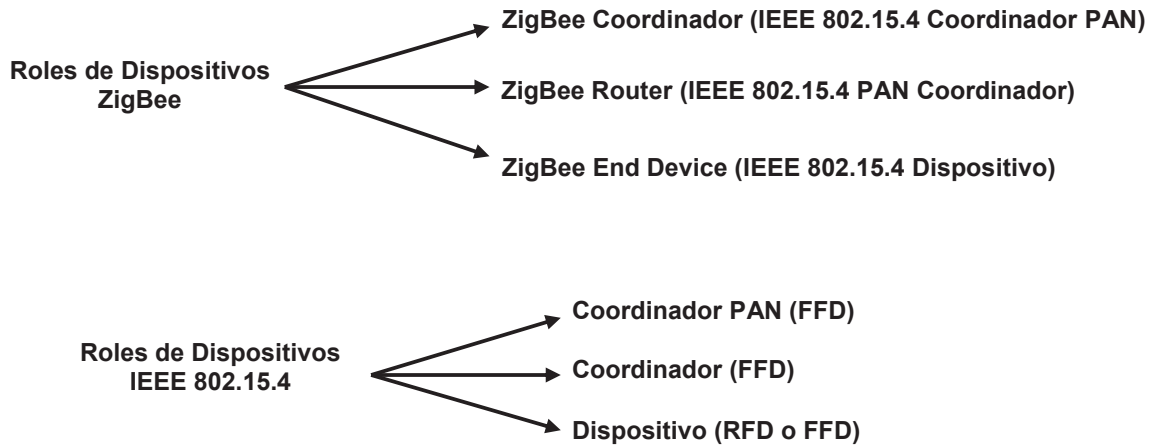


Figura 3.6 Roles en los Dispositivos IEEE 802.15.34 y el Estándar ZigBee

### 3.7 Hardware

En el mercado actualmente se pueden encontrar diferentes proveedores de hardware, por mencionar algunos tenemos a Atmel, Ember, Freescale, Microchip, NEC y Texas Instruments. Para la implementación de este proyecto se utilizaron los módulos inalámbrico del proveedor Digi, a continuación se proporciona información acerca de éstos.

#### 3.7.1 DIGI

Digi ofrece 30 diferentes combinaciones de componentes de hardware, firmas de protocolos, transmisiones de potencia y opciones de antenas.

Hay dos variedades básicas de hardware de radios XBee:

- Radios XBee Serie 1

Estos radios usan un microchip hecho por Freescale, para proporcionar una comunicación estándar punto a punto.

- Radios XBee Serie 2

Usa un microchip de Ember Networks que habilita diferentes combinaciones de red de malla del estándar ZigBee. La red de malla es el corazón de la creación de una red de sensores, el sistema que puede generar enviar datos inmensamente o soportar interacción a escala humana.

Tanto la Serie 1 como la Serie 2 tienen dos diferentes potencias de transmisión, regular y PRO. La versión regular es llamada simplemente como XBee. El radio XBee-PRO tiene mayor potencia, es más grande en tamaño y tiene un mayor costo. La Serie 1 y la Serie 2 podrían no ser compatibles entre sí por lo que se debe usar una sola versión para la creación de la red.

Para la realización de esta tesis se usaron los módulos XBee Serie 2 OEM RF con número de parte XB24-BWIT-004, que cuentan con antena de alambre. Estos módulos fueron diseñados para operar con el protocolo ZigBee, operan en la banda de frecuencia ISM 2.4 GHz y soportan las únicas necesidades de los sensores de red, bajo costo y bajo consumo de potencia.

### **3.7.1.1 Características Principales**

- **Alto rendimiento, bajo Costo**

- Indoor/zona urbana: 40 m.
- Outdoor con línea de vista: 120 m.

- Potencia de transmisión: 2mW (+3 dBm).
- Sensibilidad del receptor: -96 dBm.
- Tasa de datos de RF: 250,000 bps.
- **Redes avanzadas y Seguridad**
  - Reintentos y reconocimiento.
  - DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum).
  - Cada canal de secuencia directa cuenta con más de 65,000 direcciones únicas de red disponibles.
  - Soporta topologías punto a punto, punto a multipunto y *peer-to-peer*.
  - Redes de malla con la capacidad de autoenrutarse, autoconfigurarse y tolerante a fallos.
- **Baja Potencia**
  - Corriente de transmisión: 40 mA (@ 3.3 V).
  - Corriente de recepción: 40 mA (@ 3.3 V).
  - Corriente en apagado: < 1  $\mu$ A @ 25°C.
- **Fácil de usar**
  - No es necesaria una configuración fuera de la caja de comunicación de RF.
  - Modos de comando AT y API, para configurar los parámetros de los módulos.
  - Elemento de forma reducida.
  - Amplio conjunto de comandos.
  - Software gratuito X-CTU (para pruebas y configuración de software).
- **Soporte técnico ilimitado y gratuito.**

### 3.7.1.2 Operación de Módulos de RF

#### Comunicación Serial

La interfaz de los módulos XBee Serie 2 OEM RF hacia un dispositivo host es a través de un puerto serial asíncrono de nivel lógico. A través de un puerto serie el módulo puede comunicarse con cualquier UART, compatible en nivel lógico y voltaje, o a través de un traductor de nivel a cualquier dispositivo serial (por ejemplo a través de una tarjeta creada por MaxStream de interfaz RS-232 o de USB).

#### Flujo de Datos UART

Los dispositivos tienen una interfaz UART la cual puede conectarse directamente a los pines del módulo como se muestra en la Figura 3.7. Los datos entran al módulo a través de DIN (pin 3) como una señal serie asíncrona. Cada dato consta de 8 bits.

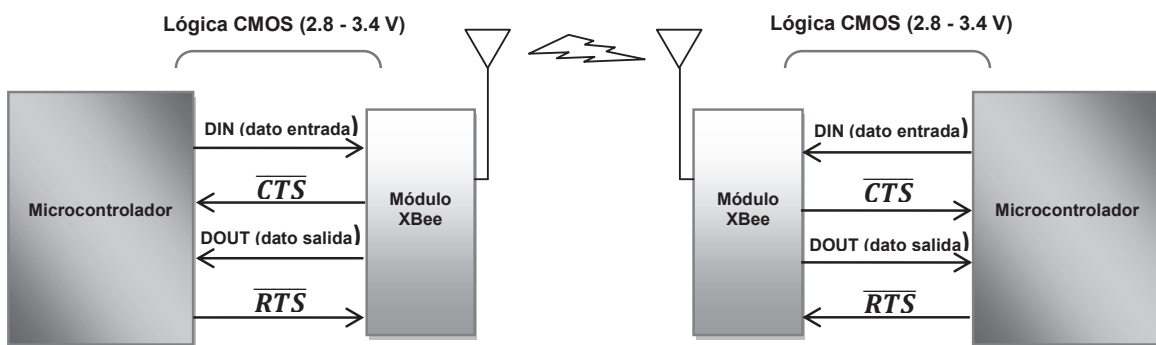


Figura 3.7 Diagrama de Flujo del Sistema de Datos en una UART – Interfaz de medio ambiente

## **Operación Transparente**

Cuando funciona en Modo Transparente, los módulos actúan como un remplazo de línea serial. Todos los datos UART recibidos a través del pin DIN son necesarios para la transmisión de RF. Cuando se reciben los datos de RF, los datos se envían al pin DOUT. Los parámetros de configuración del módulo son configurados usando la interfaz de modo de comando AT.

## **Operación API**

La operación API (Application Programming Interface, *Interfaz de Programación de Aplicaciones*) es una alternativa a la opción por default de Operación Transparente. La trama basada en API extiende el nivel en el que una aplicación host puede interactuar con las capacidades de red de los módulos.

En el modo API, todos los datos que entran y salen del módulo están contenidos en tramas que definen las operaciones o eventos dentro del módulo.

El API proporciona medios alternativos de configuración de los módulos y los datos de enrutamiento de la capa de aplicación host. Una aplicación host puede enviar tramas de datos a los módulos en donde se encuentra la dirección y la información del payload (área de datos) en lugar de usar el modo de comandos para modificar la dirección. El módulo enviará tramas de datos a la aplicación que contiene los paquetes de estado, así como la fuente y la información payload de paquetes de datos recibidos.

## Referencias

[1] Drew Gislason, ZigBee Wireless Networking, Newnes, 2008, pag.14

[2] ZigBee Alliance, <http://www.zigbee.org/About/AboutAlliance/TheAlliance.aspx>

[3] ZigBee Specification 053474r17, January 2008

### **Diseño de los nodos sensores**

En los capítulos anteriores se introdujo la teoría acerca de las redes inalámbricas de corto alcance y se dio una introducción acerca de los módulos del fabricante Digi, los cuales son utilizados en este proyecto. En este capítulo se presenta la tarjeta desarrollada para implementar al nodo sensor, configuración y arquitectura del sistema, además de una descripción técnica de manera general para la automatización de las pruebas de pericia y de los componentes que se requieren.

#### **4.1 Descripción técnica de la automatización de pruebas de pericia**

Para determinar que una persona cuenta con las habilidades necesarias de operar un vehículo debe demostrar que puede realizar ciertas pruebas como son el de frenado, saber maniobrar al estacionarse y manipular el vehículo en una trayectoria de zigzag. A continuación se presentan una serie de pruebas automatizadas utilizando los dispositivos diseñados.

#### 4.1.1 Prueba de frenado

Para esta prueba se requerirá de los siguientes elementos:

- Sensores de barrera infrarrojos para marcar y detectar el instante en el que el automóvil pasa por el punto de frenado.
- Sensores de barrera infrarrojos para marcar y detectar el límite de la línea de frenado.
- Sensor tipo radar para monitorear la velocidad del auto.
- Pantalla informativa para indicar el inicio y el fin de la prueba, así como la velocidad del automóvil.

En la pista de prueba el conductor iniciará la marcha del automóvil mediante un indicador en la pantalla, luz verde, durante ese tiempo se visualizará en la pantalla la velocidad del automóvil, en el momento en el que pase por el área de frenado, lo cual será detectado por una barrera infrarroja, la pantalla mostrará inmediatamente el semáforo en rojo. El conductor deberá frenar suavemente hasta detenerse sin sobrepasar el límite del área de frenado en donde se encontrará otro sensor de barrera infrarroja el cual detectará si el auto sobrepasó ésta línea. La manera en que se acomodaran los elementos se muestra en la Figura 4.1.

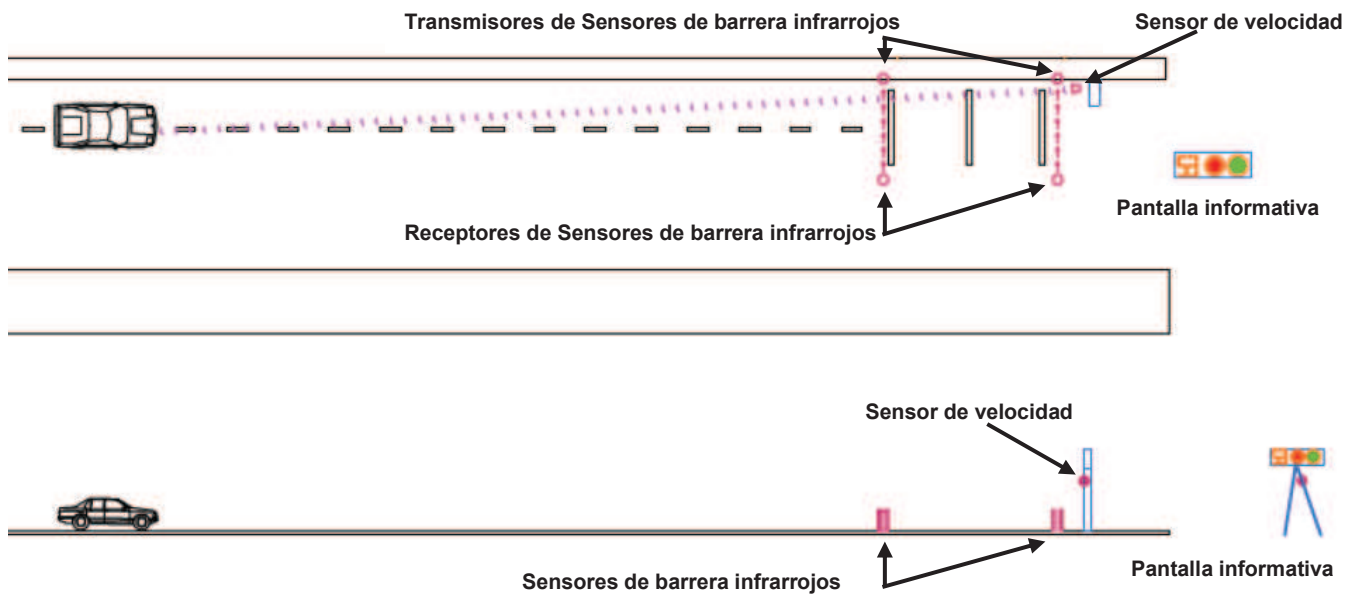


Figura 4.1 Plano de Prueba de Frenado vista área y lateral

Para la automatización de ésta prueba los indicadores se evaluarán de la siguiente manera:

- a) Desarrollar la máxima velocidad posible antes de iniciar el frenado
- b) Iniciar frenado, exactamente en el punto indicado

#### 4.1.2 Prueba de estacionamiento en paralelo

El sistema contará con los siguientes elementos:

- Barrera de contención inteligente de golpes.
- Barrera de contención inteligente de distancia.

- Pantalla informativa para indicar el inicio de la prueba y si alguna de las barreras de contención fue golpeada.

Con las barreras de contención inteligente de golpes se demarcará la longitud del espacio de estacionamiento; habrá una en la parte frontal y otra en la parte trasera del “cajón” de estacionamiento, ver Figura 4.2, La finalidad será detectar que el conductor estacione el auto sin golpear las barreras. En caso de que se detecte que el auto tocó o golpeó una barrera, se enviará una señal de aviso que podrá visualizarse en la pantalla informativa.



**Figura 4.2 Barrera de contención inteligente de golpes para estacionamiento en paralelo**

La barrera de contención inteligente de distancia se colocará en la parte lateral del cajón de estacionamiento para medir la distancia a la que se encuentra un automóvil de ella, además de enviar una señal si es que golpeada, ver Figura 4.3.



**Figura 4.3 Barrera de contención inteligente de distancia**

En el momento en que el conductor se encuentre listo para iniciar la prueba, se indicará el inicio mediante el encendido de la luz verde en la pantalla. Mientras el conductor estaciona al automóvil el sistema estará monitoreando todos los dispositivos, si se da el caso en el que un auto toca o golpea alguna barrera, se enviará un aviso mediante la luz roja en pantalla y el sistema dará por terminada la prueba.

Si el auto no golpeó alguna barrera y ha sido estacionado correctamente con el número de movimientos permitidos, el facilitador indicará al sistema y se realizará la medición de distancia entre el auto y la barrera de contención inteligente de distancia. En caso de haber quedado a una distancia permitida, la pantalla indicará que el operador ha superado la prueba mediante un parpadeo de luz verde, en caso contrario el indicador mostrará un parpadeo de luz roja. El plano aéreo y lateral de cómo quedará la ubicación de cada elemento se muestra en la Figura 4.4

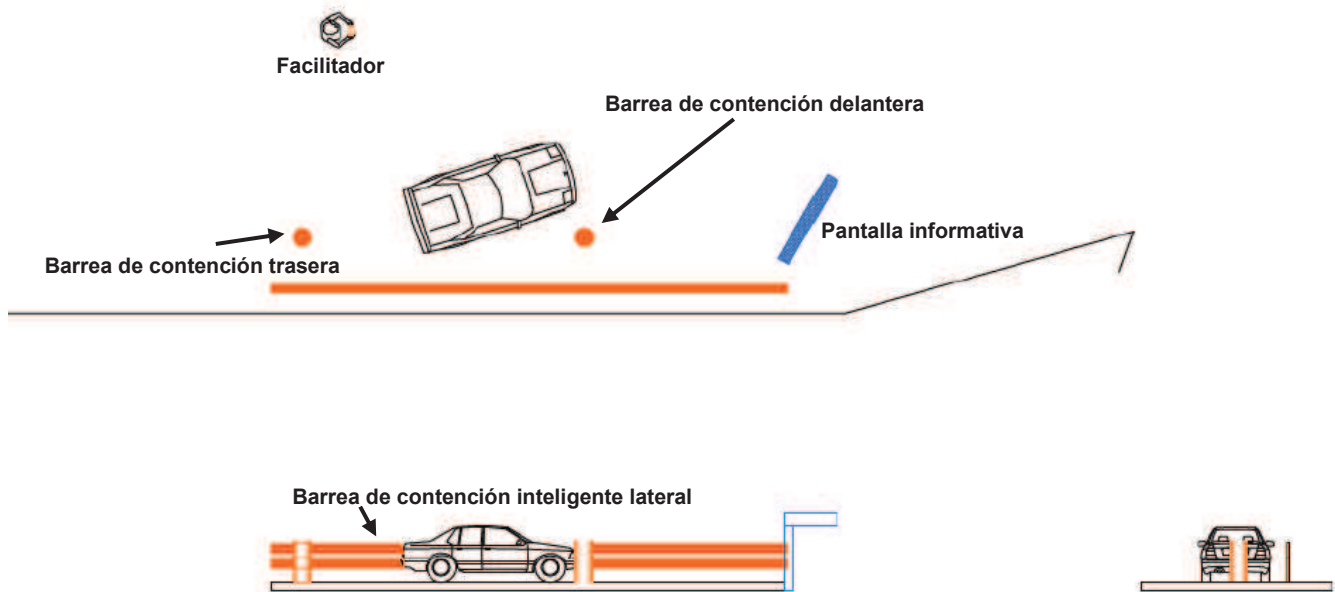


Figura 4.4 Plano de prueba de estacionamiento en paralelo

Para la automatización de ésta prueba los indicadores se evaluarán de la siguiente manera:

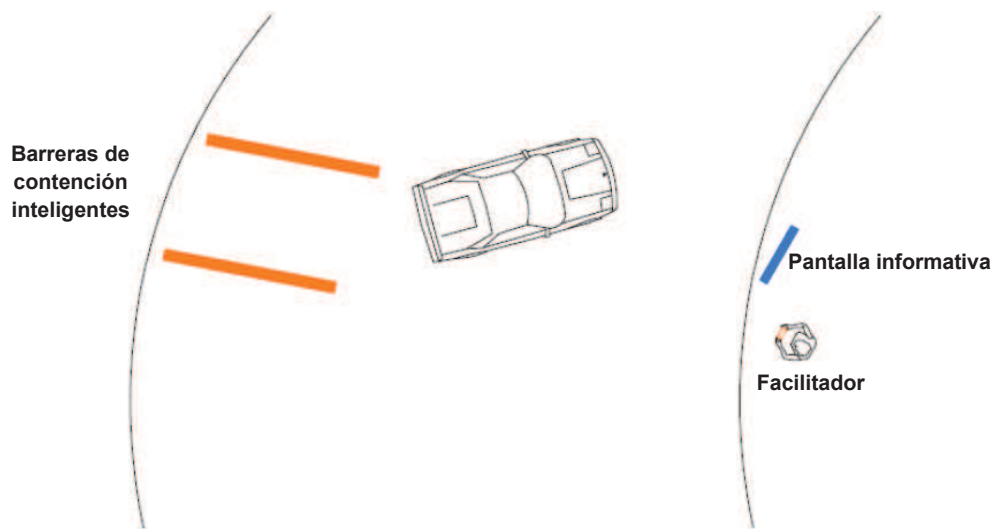
- a) No tocar las barreras
- b) Quedar entre 25 y 30 cm de la barrera

#### 4.1.3 Prueba de estacionamiento en batería

El sistema contará con los siguientes elementos:

- Barrera de contención inteligente de distancia
- Pantalla informativa para indicar inicio de prueba, detección de golpes e indicar si la prueba fue o no superada

Para la automatización de ésta prueba existirán dos barreras de contención inteligente de distancia las cuales delimitarán la longitud del espacio de estacionamiento, que formarán el cajón de estacionamiento. La figura 4.5 muestra el plano de la vista aérea de la ubicación del sistema.



**Figura 4.5 Plano de prueba de estacionamiento en batería**

En el momento en que el conductor se encuentre listo para iniciar la prueba, el facilitador de la prueba le indicará el inicio de la misma mediante la pantalla con el parpadeo de luz verde. Si se da el caso, que el auto ha tocado o golpeado a alguna de las barreras, éstas enviarán un aviso en la pantalla con el parpadeo de una luz roja, lo cual indica que falló la prueba.

Para finalizar la prueba, una vez estacionado el auto, el facilitador lo indicará al sistema y la barrera inteligente realizará la medición de la posición del automóvil. En caso de cumplir con

los requerimientos de distancia y no golpear ninguna barrera el conductor habrá superado la prueba y la pantalla mostrará una luz verde, en caso contrario mostrará una luz roja.

Para la automatización de ésta prueba los indicadores se evaluarán de la siguiente manera:

- a) No tocar las barreras
- b) Quedar entre 25 y 30 cm de la barrera

#### **4.1.4 Prueba de Zigzag**

El sistema contará con los siguientes elementos:

- Postes delimitadores inteligentes para marcar el camino (zigzag)
- Sensor de barrera infrarrojos
- Pantalla informativa para indicar inicio y fin de prueba, folio que está realizando la prueba e indicar si la prueba fue superada.

La distribución de los elementos para esta prueba quedará como se muestra en la Figura 4.6, donde los postes delimitadores inteligentes marcarán el camino. Dos sensores de barrera infrarrojos se colocarán a lo largo del trayecto para detectar el paso de los vehículos y se contará con 3 pantallas informativas, ver Figura 4.7. Esta distribución tiene la finalidad de que tres autos puedan realizar la prueba de manera simultanea.

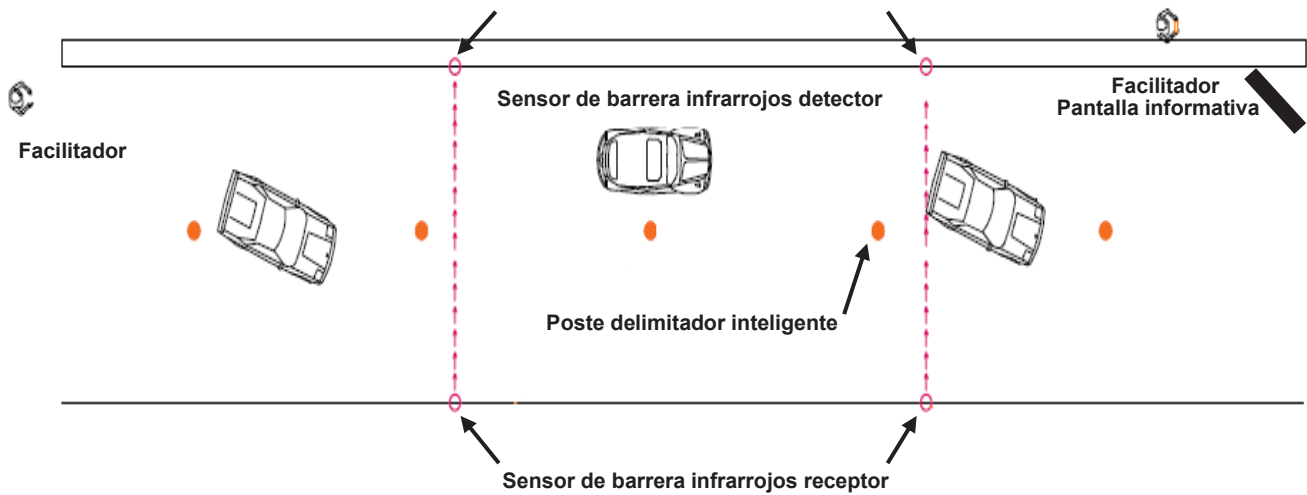


Figura 4.6 Plano de prueba de recorrido en zigzag



Figura 4.7 Pantalla informativa para prueba de zigzag

Una vez que el conductor se encuentre listo para realizar su recorrido, el facilitador indicará el inicio de la prueba en la pantalla informativa mostrando el folio del conductor y con una luz verde, verificando que el automóvil anterior que se encuentra realizando la prueba se ha

alejado lo suficiente para que el recorrido sea de forma segura. En caso de que un poste sea golpeado se informará al sistema el número de folio y poste golpeado. Al finalizar la prueba en la pantalla se visualizará si el conductor ha superado la prueba o no mediante un parpadeo de luz verde o roja para cada folio participante.

Las pruebas de zigzag tanto de frente como de reversa tendrá el mismo mecanismo.

Para la automatización de ésta prueba los indicadores se evaluarán de la siguiente manera:

#### EN REVERSA

a) No tocar barreras

#### DE FRENTE

a) No tocar barreras

## **4.2 Sensores y dispositivos**

Para llevar a cabo la automatización de las pruebas de manejo se requiere del uso de sensores los cuales nos proporcionan información relevante como son acelerómetros, indican una posición, ultrasónicos, indican una velocidad, de temperatura o infrarrojos. La información de cada sensor es transmitida sólo cuando sea solicitada, es decir, debido a una interrupción. En general registran y envían parámetros correspondientes a los vehículos relacionados con ingeniería de vial.

#### 4.2.1 Acelerómetro de tres ejes MMA7341L

Un acelerómetro es un dispositivo que permite medir el movimiento y vibraciones, en su modo de medición dinámico, y la inclinación, con respecto a la fuerza de gravedad, en su modo estático. Estos dispositivos convierten la aceleración de gravedad o de movimiento, en una señal eléctrica analógica proporcional a la fuerza aplicada al sistema, o mecanismo sometido a vibración o aceleración. Miden la aceleración en unidades “*g*”, donde un *g* se define como la fuerza gravitacional de la tierra aplicada sobre un objeto o persona. Por otro lado, en función del número de ejes en los que registran el movimiento se habla de acelerómetros uniaxiales, biaxiales o triaxiales que corresponden a uno, dos o tres ejes espaciales, los cuales son ortogonales entre si.

El acelerómetro MMA7341L, que es el de interés se alimenta de 2.2 Volts a 16 Volts por el pin *VIN*. Las salidas del acelerómetro (X, Y y Z) son tres voltajes analógicos independientes centrados en la mitad del voltaje del pin llamado 3V3, ver Figura 4.8. Las aceleraciones positivas a lo largo de un eje incrementan el voltaje de salida por encima del voltaje medio y aceleraciones negativas disminuyen la salida de voltaje por debajo del voltaje medio. Las salidas siempre serán dentro del rango de 0 Volts al voltaje del pin 3V3. El pin de selección de sensibilidad, *g-Select*, por default, es internamente puesto en bajo, esto selecciona una sensibilidad de  $\pm 3g$  (440mV/g), manejar el pin en alto le da una sensibilidad  $\pm 11g$  (118mV/g).

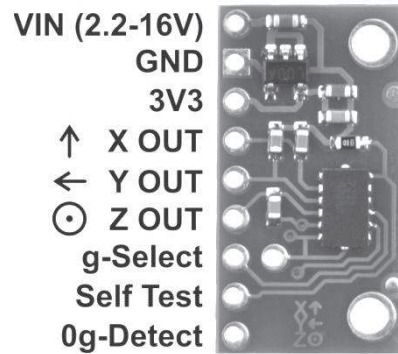


Figura 4.8 Placa de acelerómetro MMA7341L

La salida del pin *0g-Detect* en alto se presenta cuando los tres ejes simultáneamente detectan *0g*, que ocurre cuando la placa está en caída libre. El pin *Self Test* es puesto en bajo en la placa y se puede dejar desconectado. Para aplicaciones de muy baja potencia, el acelerómetro de tres ejes puede ser alimentado por el pin *3V3* conectando 2.2 a 3.6 Volts. Esto le permite pasar por alto el regulador interno y se obtiene un consumo de corriente reducida, permitiendo al microcontrolador controlar la potencia y cortarla cuando no esté en uso.

#### 4.2.1.1 Barrera de contención inteligente de golpes y poste delimitador inteligente

El acelerómetro MMA7341L se usará para formar barreras de contención y postes delimitadores inteligentes, su función será medir pequeños movimiento cuando ésta sea golpeada por un automóvil en pruebas de frenado y de zigzag, una variación de voltaje en la salida X o Y indicará que hubo un movimiento. Para la barrera de contención el sensor se

montará sobre una barricada de polietileno de media densidad con una altura de aproximadamente 130 centímetros y un ancho de 40 centímetros, cuenta con una gran resistencia a los golpes e impactos, ver Figura 4.9a. Para el caso del poste delimitador inteligente el dispositivo se montará sobre un pilar de PVC con un altura de aproximadamente 1 metro y un diámetro de 40 centímetros, éste también cuenta con una gran resistencia a fuertes impactos, ver Figura 4.9b.

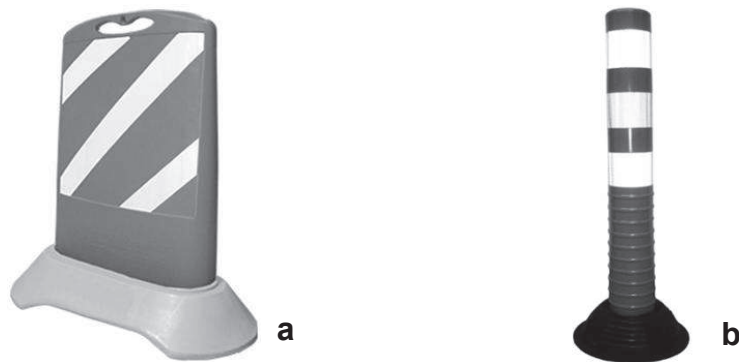


Figura 4.9. a) Barrera de contención inteligente de golpes, b) Poste delimitador inteligente

#### 4.2.2 Ultrasónico SFR02

Es un transductor de telémetro ultrasónico en una pequeña tableta de PCB, ver Figura 4.10, es decir, es un sensor que mide distancia por ultrasonido, es capaz de detectar objetos y calcular la distancia a la que se encuentra. Funciona emitiendo impulsos de ultrasonido, estos impulsos viajan a la velocidad del sonido hasta alcanzar un objeto, el sonido es

reflejado y captado de nuevo por el receptor de ultrasonidos, el cual calcula el tiempo que tarda en llegar el eco. Cuenta con dos interfaces, I2C y serial. La interfaz serial es un nivel estándar de TTL, en formato UART a 9600 bits por segundo y puede ser conectado directamente al puerto serie de cualquier microcontrolador. La distancia mínima que es capaz de medir varía entre 17 - 18 cm en un día caluroso y 15 - 16 cm en un día frío. Al igual que otros telémetros, el IRF02 puede medirse en microsegundos, centímetros o pulgadas.

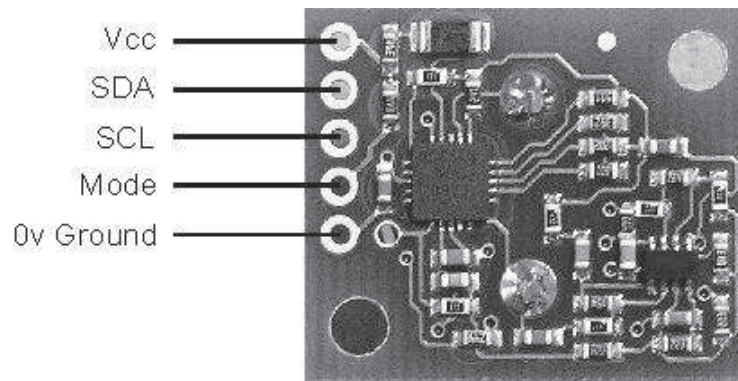


Figura 4.10 Placa de sensor SFR02

Por convención se utilizará el modo I2C, para lo cual el pin *Mode* no se conecta, el pin *SDA* corresponde a la señal de datos y *SCL* a la señal de reloj, cada pin se polariza al voltaje *Vcc* por medio de una resistencia. Cuenta con 16 direcciones (de 0xE0 a 0xFE) y las cuales se componen por seis registros, ver Tabla 4.1.

No. Registro	Lectura	Escritura
0	Revisión de Software	Comando de Registro
1	No usado (lee 0x80)	No disponible
2	Byte Alto de medida	No disponible
3	Byte Bajo de medida	No disponible
4	Valor mínimo de distancia Byte Alto	No disponible
5	Valor mínimo de distancia Byte Bajo	No disponible

**Tabla 4.1 Registros**

El único registro en el cual se puede escribir es en el 0, los registro 2 y 3 contienen el resultado de la última medida realizada con un valor total de 16 bits, el registro 4 y 5 son el resultado del valor aproximado de la distancia mínima que puede medir con un valor total de 16 bits.

#### **4.2.2.1 Barrera de contención inteligente de distancia**

El sensor SRF02 se usará para formar barreras de contención inteligentes de distancia, su finalidad será medir la distancia que se encuentra entre un automóvil y ella, además de detectar si ha sido tocada o golpeada con la ayuda del acelerómetro MMA7341L. El sensor se montará sobre una barrera vial de polietileno con una altura de aproximadamente 110 centímetros, un ancho de 40 centímetros y una longitud de 2 metros, cuenta con una gran resistencia a fuertes impactos, ver Figura 4.11.



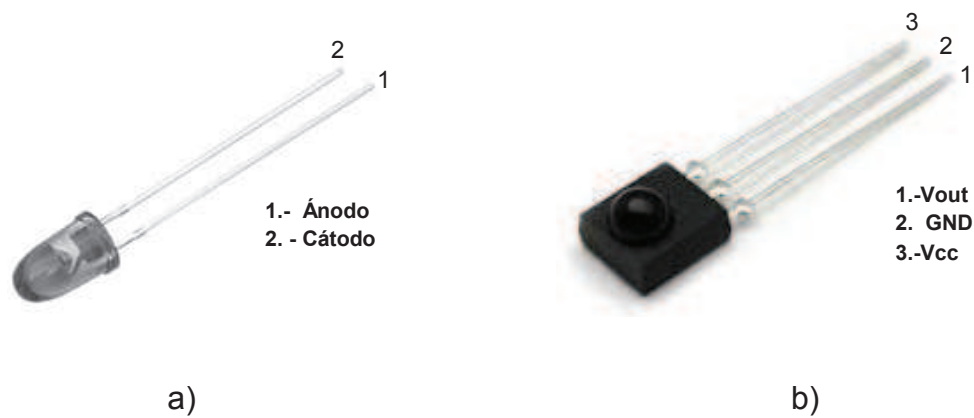
**Figura 4.11 Barrera de contención inteligente de distancia**

### **4.2.3 Infrarrojo**

Es un dispositivo que emite una longitud de onda de infrarrojo, el más popular es el diodo emisor de luz infrarrojo, LED IR, el cual opera en los 940nm. El LED IR por si sólo se encuentra incompleto ya que no es de gran interés emitir una señal si ésta no es descubierta, por lo que se requiere que sea detectada la emisión de infrarrojo, para ello se utiliza un fototransistor.

El LED IR a utilizar es el modelo IR383, de 5mm, viene en un encapsulado azul transparente, en sentido directo utiliza un voltaje de operación de 1.2 V y 50mA de corriente continua, ver Figura 4.12a.

El fototransistor es el modelo PNA4602, ver Figura 4.12b, utiliza un voltaje típico de 5 V y corriente de 2.4mA, con una recepción de distancia de 10 metros, este sensor recibe una señal modulada de 38 KHz por lo que la señal transmitida por el emisor estará modulada con un NE555 a 38 KHz.



4.12. a) Diodo emisor IR, b) Fototransistor

#### 4.2.3.1 Sensor de barrera infrarrojos

Se utilizarán el LED IR y el fototransistor para la formación de barreras. El sensor de barreras estará compuesto de dos torres, una será la emisora de infrarrojos y la otra la receptora. Su función será detectar un objeto, para nuestra aplicación automóviles. En el momento en el que algún objeto (automóvil) se interpone entre las torres el rayo infrarrojo es interrumpido lo cual es percibido por la torre de recepción y ésta indicará que ha pasado y/o existe un objeto entre las torres. Ver Figura Ver Figura 4.13.



Figura 4.13 Sensor de barrera infrarrojo

#### 4.2.4 Temperatura TMP102

Es un sensor digital de bajo consumo de potencia con SMBus del fabricante Texas Instruments. Se energiza con un voltaje que varía de 1.4V a 36V, consume 10uA de corriente como máximo cuando se encuentra activo y 10uA de corriente cuando no está activo, el resultado lo entrega en una resolución de 12 bits. Algunas de sus aplicaciones son: controles de termostato, computadoras notebook, dispositivos de temperatura electromecánicos y mediciones de temperatura en general como control industrial, equipos de prueba e instrumentación médica. Es capaz de leer temperaturas con una resolución de 0.0625°C. Opera en un rango de temperatura de -40°C a +125°C.

#### **4.2.5 Sensor radar**

Se utilizará también un sensor tipo radar (*Radio Detection and Ranging*), basado en el efecto Doppler el cual consiste en la variación de frecuencia de una onda al ser emitida o recibida por un objeto en movimiento. El sensor enviará una señal de radio frecuencia a un vehículo que se dirige hacia él, la señal enviada por el radar choca con el chasis del automóvil y rebotará hacia varios lados, parte de la señal rebotada será recibida por el radar, mediante procesamiento digital de la señal, el sistema electrónico del radar será capaz de hacer el cálculo de la velocidad del automóvil en función de los tiempos y frecuencias enviados y recibidos.

El radar tomará la lectura de la velocidad con la que transita el automóvil desde que se pone en marcha hasta el punto de frenado en intervalos constantes, esto nos permitirá tener información sobre la velocidad desarrollada por el automóvil durante el trayecto.

#### **4.2.6 Interruptor**

Se programará el encendido o apagado de un switch o interruptor, éste nos indicará su condición y su aplicación nos servirá para determinar el estado en que se encuentra algún dispositivo.

#### **4.2.7 Pantalla Informativa (Display)**

Esta pantalla contará con dos displays numéricos de siete segmentos y dos indicadores tipo semáforo, ver Figura 4.14. Será diseñada mediante tecnología LED lo cual representa las siguientes ventajas:

- Buena visibilidad
- Bajo consumo de energía
- Larga vida útil
- Relación tamaño/peso óptimos.

Tiene como objetivo indicar al conductor cuándo debe iniciar su recorrido, luz verde, cuándo debe empezar a frenar, luz roja, e indicar la velocidad del automóvil.

Para el display de siete segmentos se utilizaron LEDs ultrabrillantes y se diseñó con el software de Dip Trace, ver Figura 4.15, por dos razones principalmente, primero para minimizar costos y segundo porque de manera comercial no están a la venta los tamaños que se requieren. Las medidas de éste display son aproximadamente de 27 X 15 cm.



Figura 4.14 Pantalla informativa

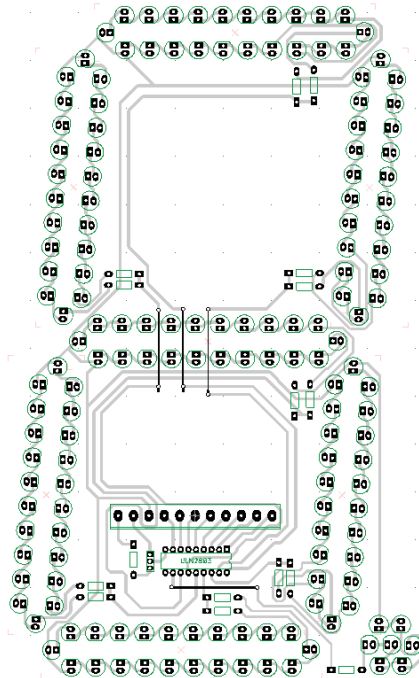


Figura 4.15 Display de siete segmentos

### **4.3 Diseño del nodo sensor**

Como se explicó en el capítulo anterior los módulos XBee requieren de una comunicación serie a través de una UART. El fabricante de los módulos vende tarjetas de implementación las cuales cumplen con esta característica, se pueden comunicar con una computadora ya sea por el puerto serie o por el USB, y cuenta con varios puertos para conectar diversos tipos de sensores.

Adquirir éstas tarjetas no es rentable ni conveniente ya que requerimos que los nodos sean portátiles, autónomos, inteligentes y de bajo consumo de energía, sin dejar de observar que se restringe el tipo de sensor que se puede utilizar. Por otro lado, la capacidad de procesamiento es limitado, ya que no cuentan con un microcontrolador integrado y el precio de estas tarjetas es elevado. Por lo que en este capítulo se presenta el diseño del nodo sensor propuesto para el diseño de la red.

#### **4.3.1 Arquitectura del nodo sensor**

Fue diseñada una tarjeta a la que llamamos nodo sensor que incluye un radio transmisor, una unidad de procesamiento, una unidad de almacenamiento, puertos digitales y analógicos y una fuente de alimentación. La arquitectura implementada se muestra en la Figura 4.16.

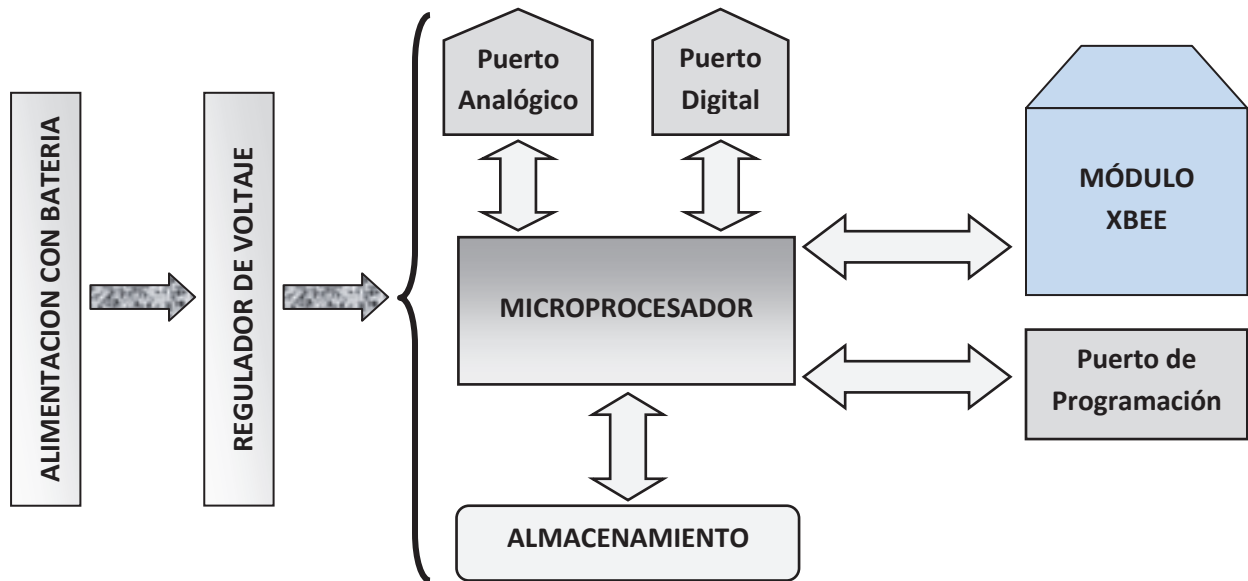


Figura 4.16 Arquitectura del Sistema

Todo el sistema se encuentra embebido en una sola tarjeta, la batería alimentará al nodo sensor así como a los componentes que lo integran, la información que se obtenga de la lectura de los sensores podrá ser transmitida por el módulo XBee y/o guardada en la unidad de almacenamiento SD. Cada nodo contará con un microprocesador y éste será programado de acuerdo a las necesidades de cada aplicación.

#### 4.3.1.1 Diseño del PCB para los nodos sensores.

La tarjeta de PCB se realizó con el software de diseño Dip Trace, ver Figura 4.17, en ella se observa la arquitectura mencionada anteriormente. En éste software se encontraron la



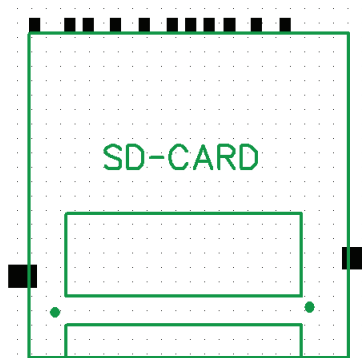


Figura 4.19 Patrón de tarjeta SD

#### 4.3.1.2 Batería / Fuente de energía

Para alimentar la placa se cuenta con un conector de tornillo (BATT) el cual va dirigido al regulador de voltaje KA78R33. Éste regulador es de baja caída de voltaje, la caída es por debajo de los 0.5 Volts cuando se usa el máximo de corriente permitida, entrega a la salida 3.3 V y hasta 1 Ampere de corriente, soporta un voltaje de entrada de hasta 35V, el tipo de encapsulado es TO-220 con 4 pines, tiene protección de sobrecorriente, protección contra corto circuito y apagado térmico, el pin *Vdis* tiene la función que activar o desactivar la salida, *Vin* corresponde al voltaje de entrada, *Vo* el voltaje de salida y *GND* la tierra, ver Figura 4.20.

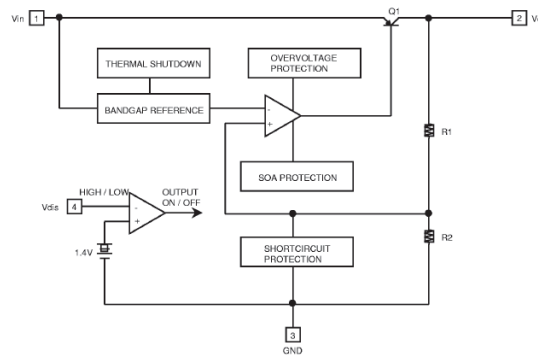


Figura 4.20 Diagrama de bloque del regulador KA78R33

Para energizar a todos los componentes de la tarjeta la alimentación el voltaje de entrada consistirá de 3 pilas doble A para obtienen 4.5 volts.

#### 4.3.1.3 Microprocesador y Puertos

El microprocesador a utilizar será el PIC16F1827 de Microchip. Es de bajo consumo de potencia, se puede energizar de 1.8 Volts a 3.3 Volts, tiene una corriente de operación de  $75\mu\text{A}$ , en *modo Sleep* consume  $30\text{nA}$ , cuenta con 256 bytes de datos en EEPROM, oscilador interno de 32 MHz, consiste de 18 pines de entre los cuales se obtienen: 15 pines de entrada/salida, ADC de 10 bits de resolución, módulo comparador, módulo PWM y módulo USART; de estos pines se obtendrán los puertos analógico y digitales que dependerán de las necesidades del nodo sensor.

Tiene una arquitectura optimizada para compilarse en el lenguaje de programación de alto nivel C, también se puede compilar con lenguaje ensamblador, por cuestiones de simplicidad y debido a que no se requiere de una programación extensa ésta se realizará con lenguaje

de alto nivel, *mikroC*, éste software contiene bibliotecas específicas para microprocesadores que hacen más fácil y rápida la programación.

#### **4.3.1.4 Almacenamiento**

Para almacenar la información que registraran los sensores se contará con una tarjeta de memoria SD. Ésta es un dispositivo de almacenamiento de memoria flash diseñado para proporcionar una alta capacidad de no volatilidad y almacenamiento regrabable en un tamaño pequeño. Actualmente están disponibles capacidades desde los 256 MB a los 8 GB. Las tarjetas vienen en tres tamaños: estándar, mini y micro. La Tabla 4.2 enlista algunas especificaciones de la tarjeta más común, la SD estándar que se utilizará en este proyecto.

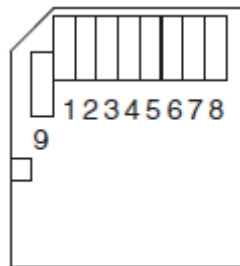
Las ventajas que podemos encontrar al utilizar este tipo de memoria son:

- ✓ Un protocolo de comunicación simple
- ✓ Una comunicación full dúplex
- ✓ Una interfaz de hardware muy simple

	SD Estándar
Dimensiones	32 x 24 x 2.1 mm
Peso de tarjeta	2.0 gr.
Voltaje de operación	2.7 - 3.6 V
Protección de escritura	SI
Pines	9
Interfaz	SD o SPI
Consumo de corriente	<75mA (escritura)

**Tabla 4.2 Especificaciones de tarjeta SD estándar**

Las tarjetas SD pueden tener una interfaz con microcontroladores usando dos diferentes protocolos: protocolo de tarjeta SD y el protocolo SPI (*Serial Peripheral Interface*); éste último es el que se empleó en el proyecto. La tarjeta SD estándar tiene 9 pines, ver Figura 4.21, los cuales tiene diferentes funciones dependiendo del protocolo de interfaz.



**Figura 4.21 Tarjeta SD**

El *bus SPI* es un bus serial asíncrono estándar que utiliza el modo full dúplex. Opera en modo *maestro-esclavo*, donde el dispositivo *maestro* inicializa la transferencia de datos, proporciona un reloj y selecciona a un *esclavo*. Se puede operar con un sólo *maestro* y uno a más dispositivos *esclavos*. Esta interfaz simple es llamada *interfaz "four-wire"*.

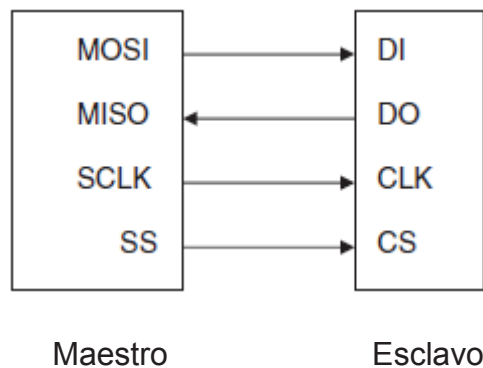
Las señales en el bus SPI son llamadas de la siguiente manera:

- MOSI - salida maestro, entrada esclavo
- MISO – entrada maestro, salida esclavo
- SCLK – reloj serial
- SS – selección de esclavo

Las señales son nombradas como:

- DO – salida de datos
- DI – entrada de datos
- CLK - reloj
- CD – selección de chip

La Figura 4.22 muestra una conexión básica entre un dispositivo maestro y un esclavo en un bus SPI. El maestro envía una salida de datos en MOSI y recibe en los datos en la línea MISO.



**Figura 4.22 Conexión SPI maestro –esclavo**

Como podemos observar el uso de una memoria SD:

- Requiere de cuatro pines
- No hay hardware de control de flujo
- No hay reconocimiento de *esclavo*

Cuando la tarjeta SD es operada en modo SPI, sólo siete pines se usan, tres son para energizar (pin 3, 4 y 6) y cuatro pines para la operación del modo SPI (1, 2, 5 y 7).

- Dos para la alimentación a tierra, pin 3 y 6.
- Fuente de alimentación, pin 4.
- Selección de Chip, pin1.
- Salida de datos, pin 7.
- Entrada de datos, pin 2.
- Reloj, pin 5.

El lenguaje de mikroC proporciona un conjunto extenso de bibliotecas de mandos para inicializar, leer y escribir en la tarjeta SD.

#### **4.3.1.5 Módulo XBee**

Los módulos usados son los XBee Serie 2 OEM RF con número de parte XB24-BWIT-004 del fabricante Digi, los módulos son configurados con el software que proporciona el fabricante, el X-CTU, el cual es gratuito. Los dispositivos tienen la capacidad de funcionar

como coordinadores, ruteadores o dispositivos finales. Hay que recordar que la Serie 2 nos permite crear una red de sensores de malla, razón por la cual fue elegida.

#### 4.4 Codificación de nodos y sensores

Para identificar la información procedente de un nodo que llegará al coordinador, se propone llegue en una sola línea dividida en tres bloques divididos por un guión: 1) una letra y un número para indicar a que nodo pertenece, 2) dos o tres letras que indiquen el tipo de sensor o barrera que se encuentra en el nodo, junto con un número y 3) el valor o valores que el sensor registró.

Para indicar el tipo de sensor o barrera que se usará la Tabla 4.3 muestra la siguiente codificación:

Interruptor	INT#
Temperatura	TM#
Radars	RD#
Barrera Infrarroja	BIR#
Barrera de Contención Inteligente de golpes	BCG#
Poste Delimitador Inteligente	PDI#
Barrera de Contención Inteligente de Distancia	BCD#
Sensor de Barrera Infrarrojos	BIR#
Display informativo	DPY#

Tabla 4.3 Codificación de sensores

Por ejemplo si se tiene en el nodo 1 un Router con el Interruptor 1 que indica que éste se encuentra encendido, la lectura que se verá en la computadora o terminal será la siguiente:

R1-INT1-ENCENDIDO

Rediseño del nodo

Después de realizar un estudio y prueba de conexión de sensores y módulos se determinó necesario tener dos UARTS, una de ellas para el módulo XBee y otra para la memoria SD, por lo que se diseñó un nuevo nodo, ver Figura 4.23.

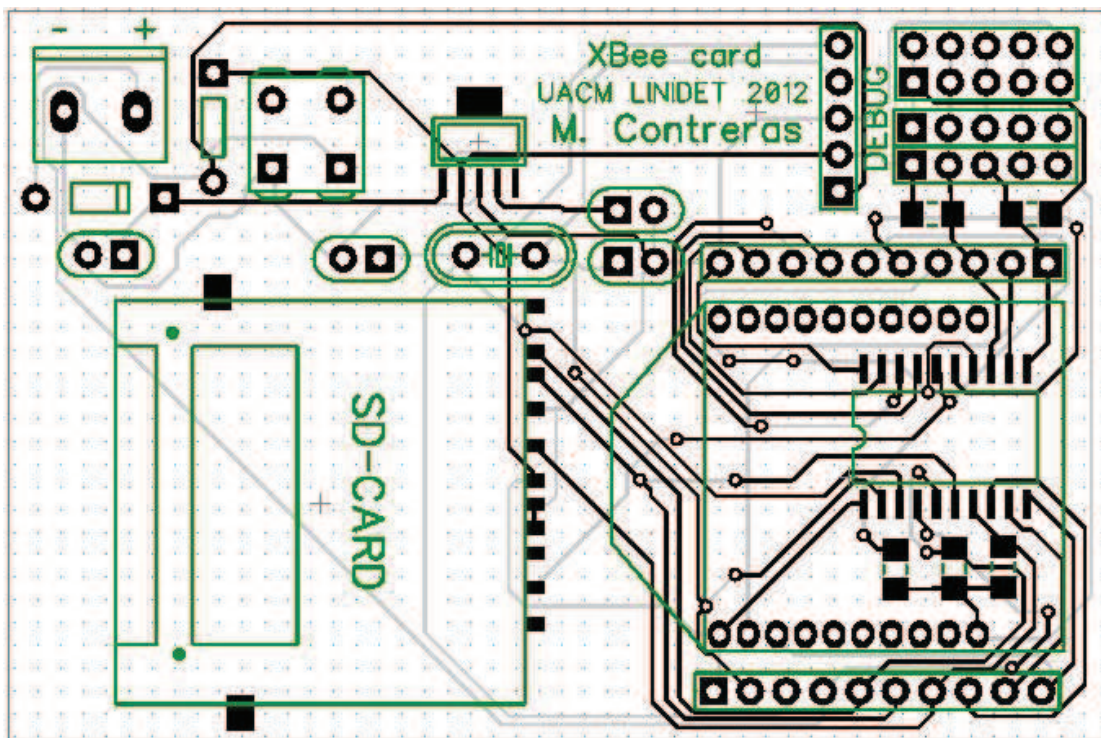


Figura 4.23 Tarjeta PCB del nodo sensor modificada

## Referencias

Ibrahim, Dogan, Advanced PIC microcontroler projects in C, From USB to RTOS with the PIC18F Series, Newnes, 2008.

CENFES, AC. Centro para el fomento de la educación y la salud de los operarios del transporte público de la Ciudad de México, Coordinación de pericia.

### **Diseño de la red y análisis de desempeño**

En este capítulo se define el diseño de la red de acuerdo a las necesidades del proyecto. Se realiza un análisis del desempeño de la red propuesta debido a que las comunicaciones inalámbricas al ser propagadas por el medio ambiente presentan pérdidas parciales o totales de la información debido a diversos factores, con éste análisis se tiene la mayor seguridad de que los datos enviados a través de la red son correctos y que llegan a su destino; de esta manera también se puede determinar la confiabilidad de la red.

#### **5.1 Algoritmos para las prueba de manejo**

El siguiente capítulo explica los algoritmos que se utilizarán para cada prueba, es decir, la forma en que cada nodo sensor estará interactuando dentro de la red. Para simplificar el nombramiento de dispositivos se utilizará la codificación de nodos y sensores que se mencionó en el capítulo anterior.

### 5.1.1 Algoritmo para la prueba de frenado

Para ésta prueba se requiere de dos barreras de infrarrojos nombrados R1-BIR1 y R2-BIR2, en cada barrera se encuentran fototransistores que reciben en todo momento la señal modulada del diodo emisor, un sensor radar R3-RD1, que se encargará de medir la velocidad del auto y un display R4-DPY1, que muestra la luz roja, luz verde y velocidad.

El inicio de la prueba será enviado por la central, es decir por el coordinador, hacia R4-DPY1 con la instrucción de encender la luz verde la cual indica que el auto deberá comenzar a avanzar e ir acelerando, de forma paralela el sensor radar R3-RD1 enviará la información de la velocidad a la que va el auto y será visualizada en el display R4-DPY1. Cuando el auto cruza la primer barrera R1-BIR1, el fototransistor pierde la comunicación con el diodo emisor de luz infrarrojo, el nodo envía ésta información al coordinador, el coordinador lo interpretará como que un auto ha cruzado la línea de frenado y éste manda la señal para que sea encendida la luz roja en el display R4-DPY1, por consiguiente el conductor disminuirá la velocidad hasta detener el auto totalmente. La barrera R2-BIR2 estará sensando en todo momento e informará si el auto sobrepasa el límite, si se da éste caso se enciende la luz roja, tanto para el caso en que detecte o no detecte se envía un reporte a la central. Se anexa un diagrama de flujo, ver Figura 5.1 y Figura 5.2.

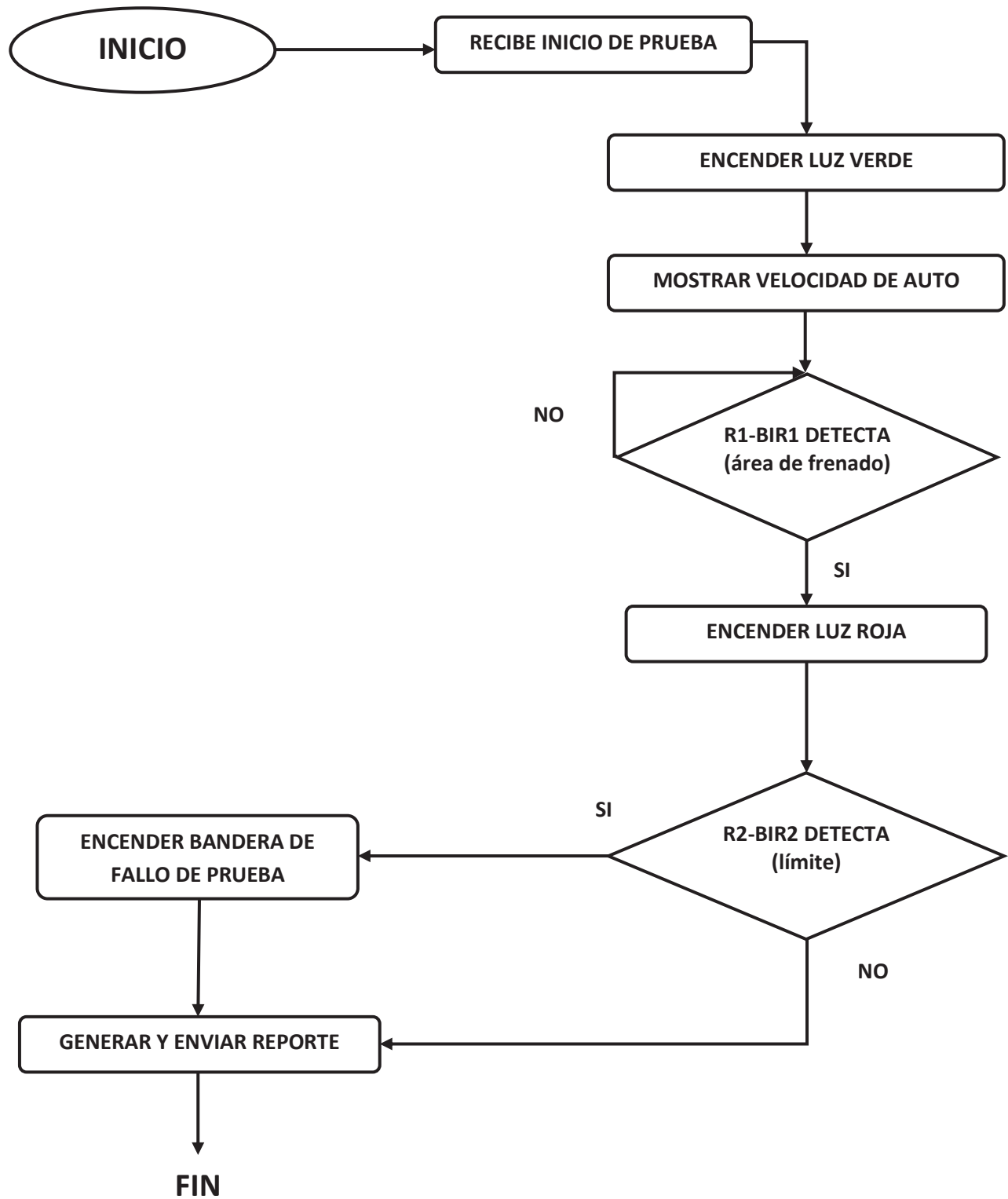


Figura 5.1 Diagrama de flujo de prueba de frenado

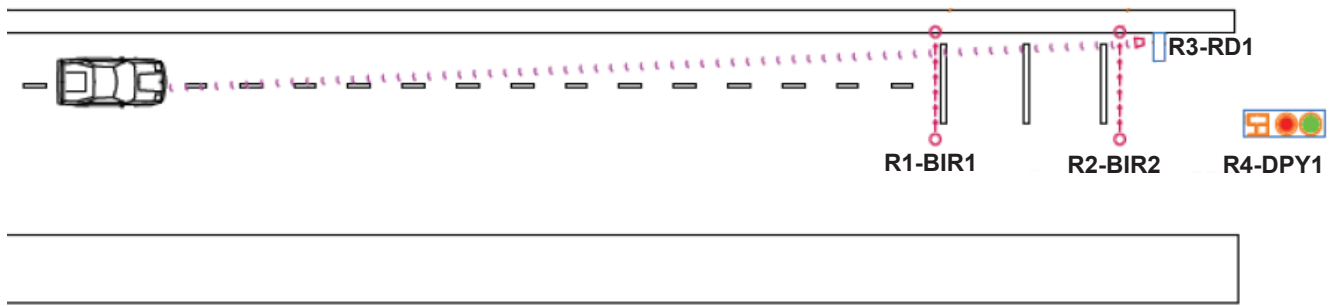


Figura 5.2 Prueba de frenado con codificación de nodos

### 5.1.2 Algoritmo para la prueba de estacionamiento en paralelo

Para el caso de la prueba de estacionamiento en paralelo se tienen dos barreras de contención inteligente de golpes, una para la parte frontal, R5-BCG1, y otra para la parte trasera, R6-BCG2, barrera de contención inteligente de distancia R7-BCD1 y una pantalla informativa R8-DPY2. Para dar inicio de la prueba se indicará mediante el encendido de luz verde en R8-DPY2, el conductor estacionará el auto y si alguno de las barreras detecta que fueron golpeadas se avisa mediante la luz roja en display. Si el auto no golpeó las barrera se realiza la medición de distancia entre el auto a la barrera R7-BCD1, ver Figura 5.3 y 5.4.

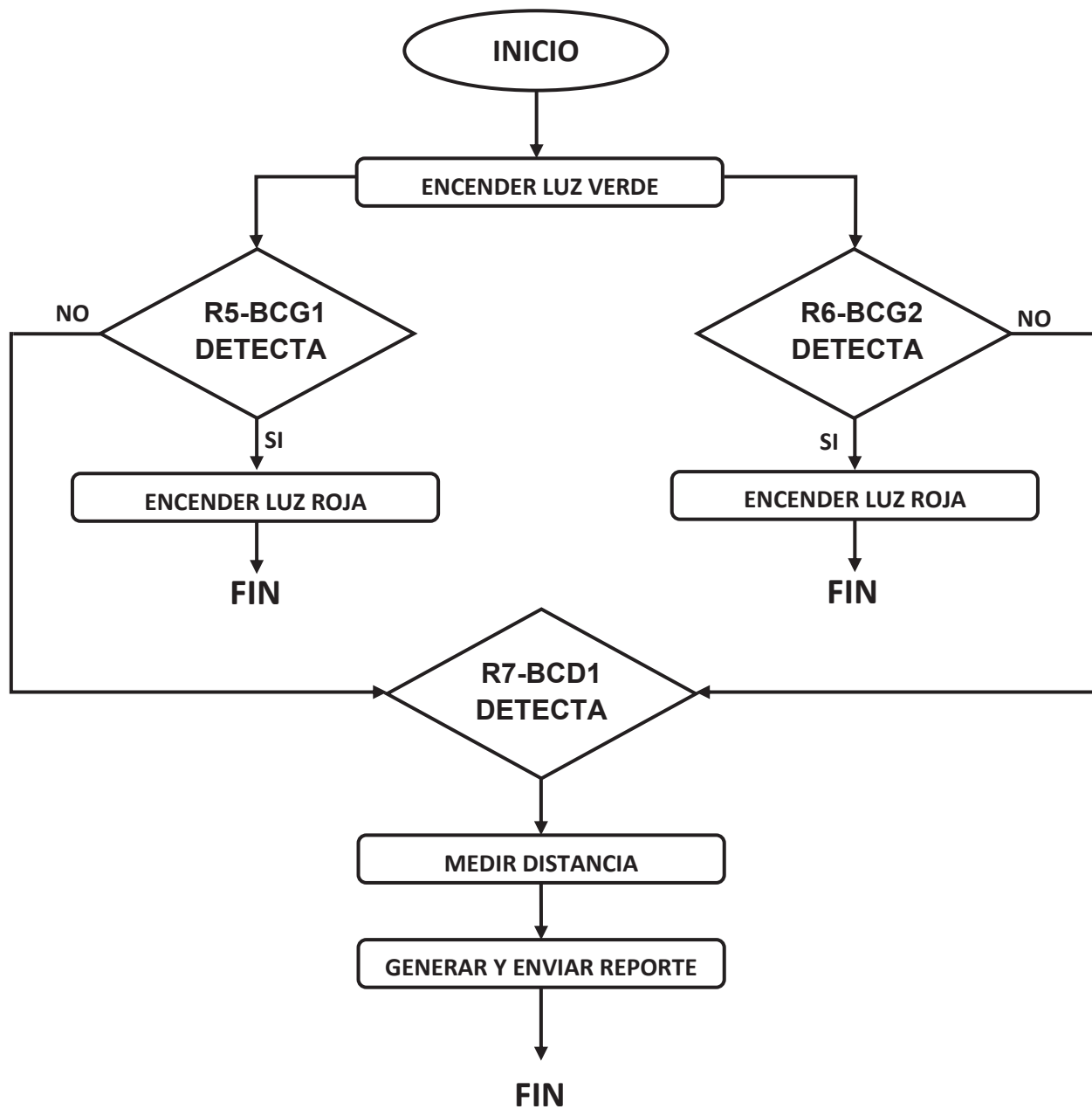


Figura 5.3 Diagrama de flujo de prueba de estacionamiento en paralelo

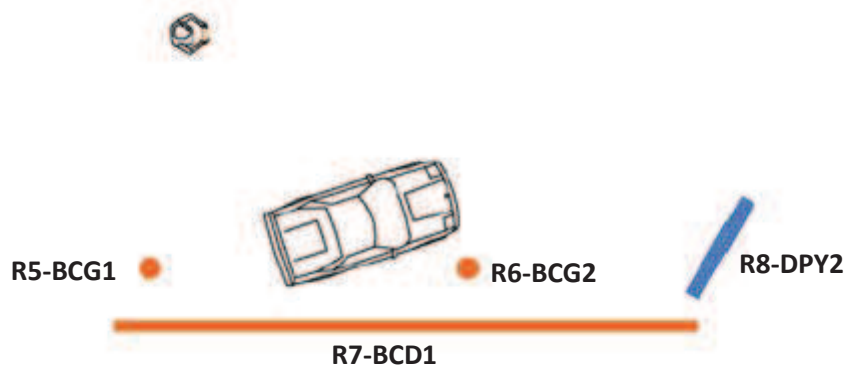


Figura 5.4 Estacionamiento en paralelo con nodos sensores codificados

### 5.1.3 Algoritmo para la prueba de estacionamiento en batería

Para ésta prueba se requiere de dos barreras de contención inteligente de distancia, una para el lado izquierdo R9-BCD1 y otra para el lado derecho R10-BCD2, además de una pantalla informativa, R11-DPY1. El inicio de la prueba se indica cuando se enciende la luz verde, el conductor empieza la maniobra y las barreras detectarán si en algún momento fueron tocadas avisando mediante la luz roja en la pantalla, cuando el conductor ha terminado el facilitador indicará al sistema mediante un interruptor R12-INT1 y las barreras realizarán la medición que hay entre el automóvil y ellas, ver Figura 5.5 y 5.6.

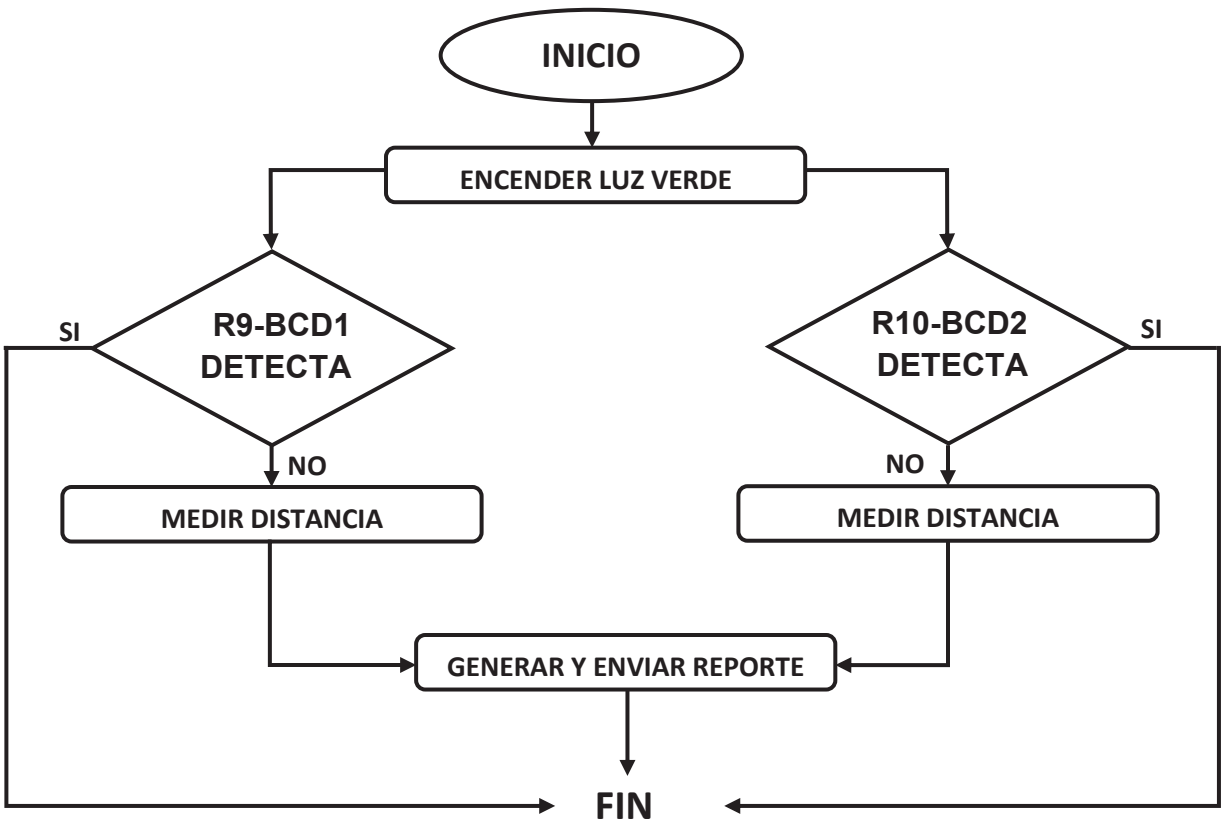


Figura 5.5 Diagrama de flujo para prueba de estacionamiento en batería

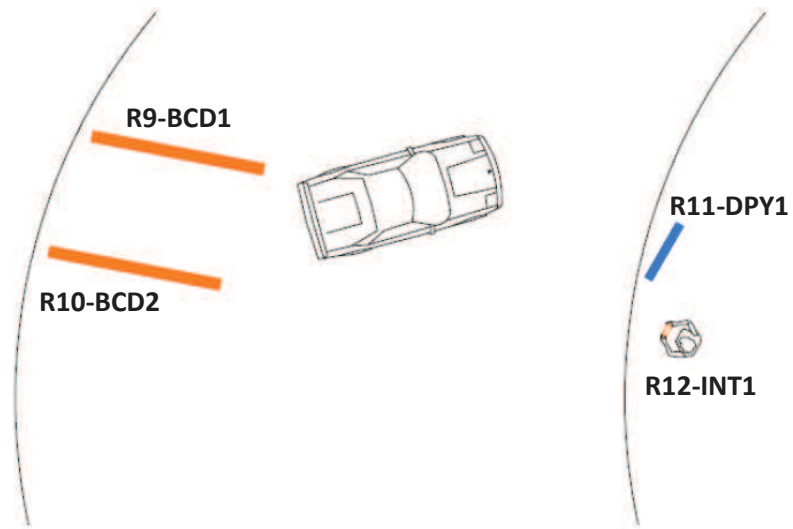


Figura 5.6 Estacionamiento en batería con nodos sensores codificados

#### **5.1.4 Algoritmo para la prueba de zigzag**

Por último para ésta prueba se utilizarán cinco postes delimitadores inteligentes, R13-PDI1, R14-PDI2, R15-PDI3, R16-PDI4 y R17-PDI5, dos barreras de infrarrojos, R18-BIF1 y R19-BIF2 y tres pantallas informativas las cuales se encargaran de mostrar el número de folio, una luz roja y una verde, R20-DPY1, R21-DPY2 y R21-DPY3. En esta prueba cada automovilistas verá su número de folio en una pantalla informativa, el inicio de la prueba se indicará con el encendido de una luz verde, en ese momento el automovilista comenzará a manejar y los postes indicarán si fueron tocados mediante el encendido de una luz roja en el numero de folio correspondiente. Las barreras de infrarrojos servirán para ir identificando a cada automóvil.

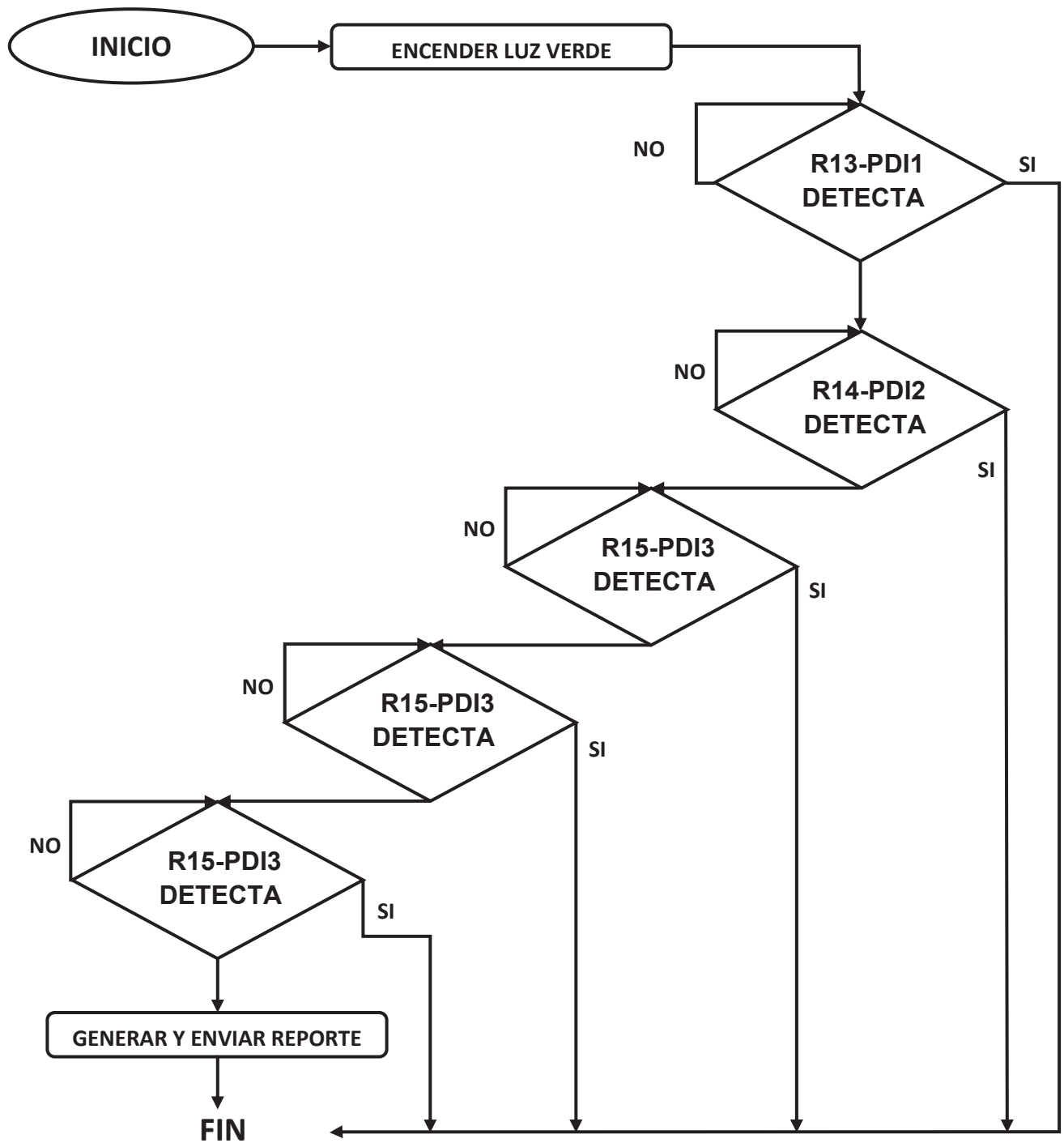


Figura 5.7 Diagrama de flujo de prueba de zig zag

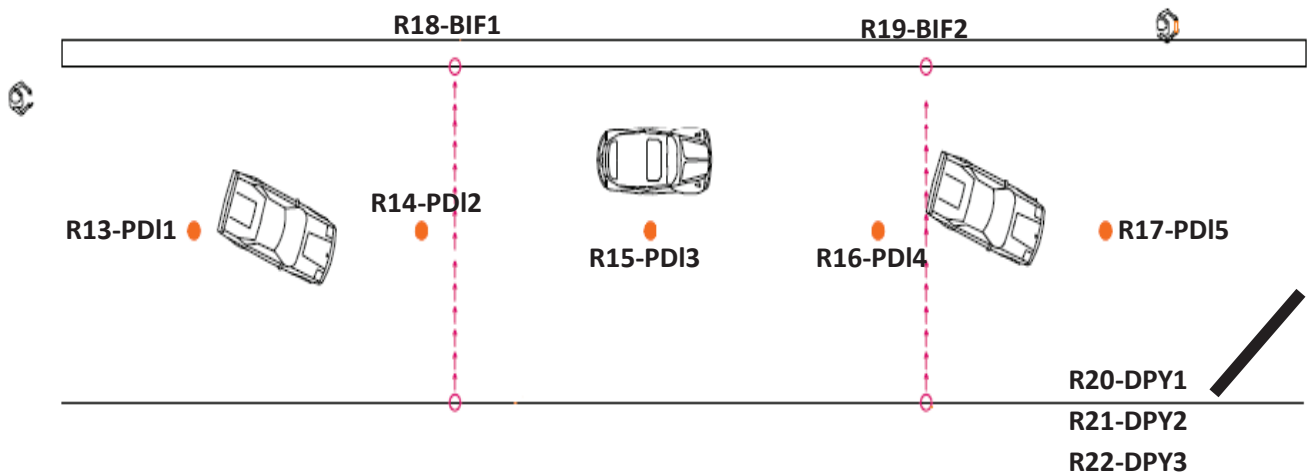


Figura 5.8 Prueba de estacionamiento en batería con nodos sensores codificados

Para tener un panorama más amplio de lo que implicaría tener en funcionamiento toda la red de sensores, a continuación, se presenta un plano aéreo en el que se muestran todos los nodos que se requieren, numerados y codificados, para realizar las pruebas de pericia de manera simultánea, ver Figura 5.9.

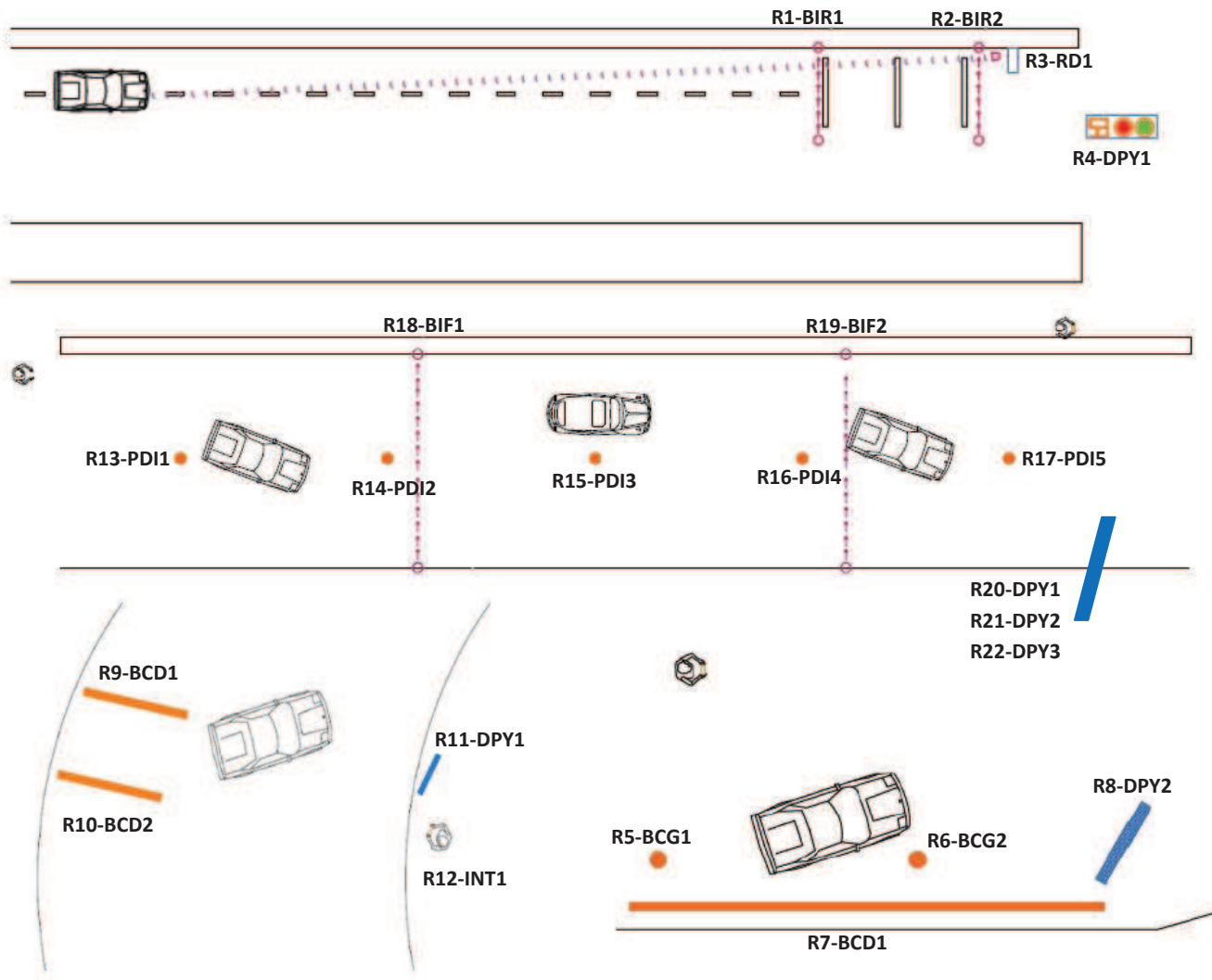


Figura 5.9 Plano aéreo de las 4 pruebas de pericia

La Figura 5.9 muestra que se requiere de al menos 22 nodos sensores. El módulo que corresponde al coordinador no se incluye en estos nodos, ese estará conectado a una computadora mediante una tarjeta de implementación.

## 5.2 Diseño de la red

Se propone realizar una red de malla utilizando un *coordinador* y varios *routers*. El *coordinador* se encargará de gestionar la red, recibir la información y retransmitirla si es necesario, los *routers* se encontrarán en todos los nodos sensores y su función será enviar la información leída, si es el caso retransmitirán la información de otro nodo, no se considerará a los *end device* ya que estos no pueden retransmitir información y no cumplen con la particularidad de la red de malla. El coordinador se comunicará con una computadora mediante el puerto USB conectado a una tarjeta de montaje superficial conocida como XBee Explorer; ésta tarjeta también servirá para realiza la programación de los módulos ya sea como *routers* o *coordinadores*.

En todos los nodos sensores la configuración de los módulos XBee será como *routers*, esto con la finalidad de poder retransmitir la información no importando donde se encuentren, ya que al ser portátiles éstos se podrán colocar en donde sea más conveniente.

También para el diseño de la red se recurrirá a las herramientas con las que cuentan los módulos, como son la forma en que se comunican los dispositivos, su direccionamiento, la transmisión y descubrimiento de red y el algoritmo de ruteo AODV.

### 5.2.1 Comunicación de Red ZigBee

ZigBee soporta direccionamiento de dispositivos y direccionamiento de capa de aplicación. El direccionamiento de dispositivos especifica en un paquete la dirección del dispositivo al que

va destinado. El direccionamiento de capa de aplicación indica una aplicación particular de recibimiento, conocido como punto final de ZigBee, junto con un mensaje de tipo de campo llamado *Cluster ID*. El *Cluster ID* define una función particular o acción sobre un dispositivo.

El protocolo 802.15.4 sobre el cual el protocolo ZigBee está construido especifica dos tipos de direccionamiento:

- Direccionamiento de red de 16 bits
- Direccionamiento de 64 bits

#### **5.2.1.1 Direccionamiento de red de 16 bits**

Un direccionamiento de red de 16 bits es asignado a un nodo cuando el nodo se une a la red. El direccionamiento de red es único en cada nodo en la red. Sin embargo, el direccionamiento de red no es estático, este puede cambiar.

Las siguientes dos condiciones pueden causar a un nodo recibir una nueva dirección de red:

1. Si un *end device* no puede comunicarse con su padre éste puede necesitar dejar la red y reincorporarse para encontrar un nuevo padre.
2. Si el tipo de dispositivo cambia de *router* o *end device* o viceversa, el dispositivo dejará la red y se reincorporará con el nuevo tipo de dispositivo.

ZigBee requiere que los datos se envíen a la dirección de red de 16 bits del dispositivo destino. Esto requiere que los 16 bits de dirección se descubran antes de la transmisión de datos.

### **5.2.1.2 Direccionamiento de 64 bits**

Cada nodo contiene una única dirección de 64 bits. Los 64 bits únicos de direccionamiento identifican a un nodo y son permanentes.

## **5.2.2 Transmisión de datos**

Todos los paquetes de datos son direccionados usando tanto el direccionamiento de dispositivo como el de direccionamiento de capa de aplicación. Los datos pueden ser enviados como una transmisión broadcast, multicast o unicast.

### **5.2.2.1 Transmisión broadcast**

La transmisión broadcast dentro del protocolo ZigBee esta destinada para ser propagada a través de toda la red, de tal modo que todos los nodos reciben la transmisión. Para lograr esto, todos los dispositivos que reciben una transmisión broadcast retransmitirán el paquete 3 veces, ver Figura 5.10.

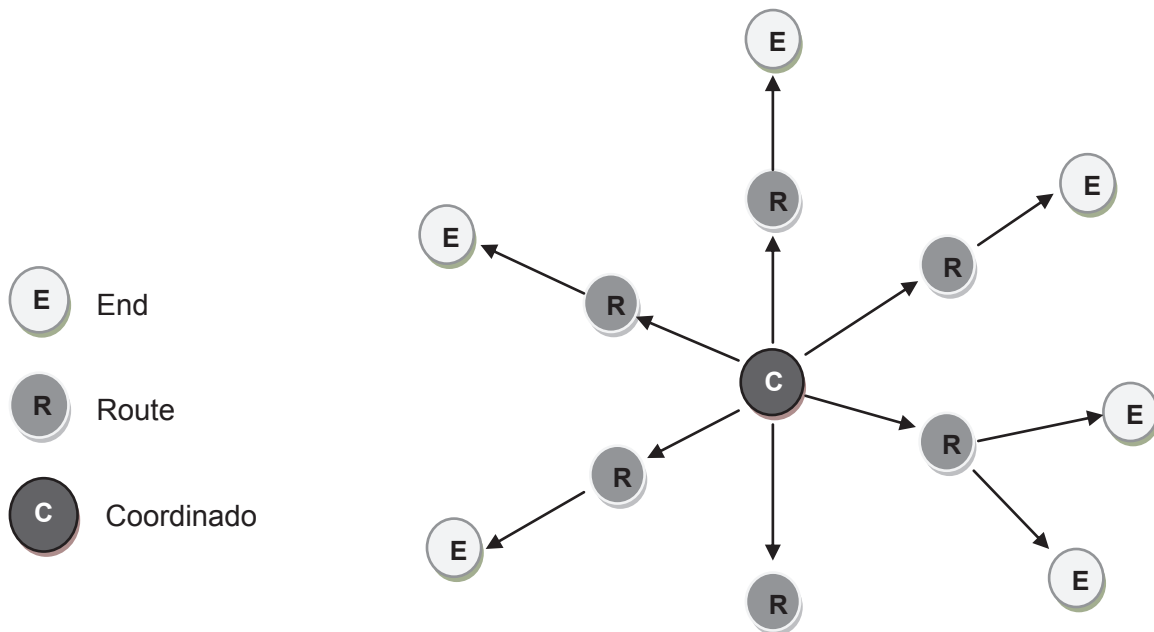


Figura 5.10 Transmision de Datos por Broadcast

Cada nodo que transmite el broadcast también creará una entrada en una tabla local de transmisión broadcast. Esta entrada es usada para realizar un seguimiento de cada paquete de broadcast recibido y asegurar que los paquetes no sean infinitamente transmitidos, cada entrada perdura durante 8 segundos. La tabla de transmisión de broadcast tiene una capacidad de 8 entradas.

Para cada transmisión broadcast, la pila de ZigBee debe reservar espacio en memoria para almacenar una copia de paquete de datos, ésta copia es utilizada para retransmitir paquetes en caso de ser necesario. Paquetes grandes de broadcast requieren mayor espacio de memoria.

### **5.2.2.2 Transmisión Multicast**

La transmisión multicast opera de manera similar a la transmisión de broadcast. Los paquetes de datos son transmitidos a través de la red de manera similar a broadcast. Sin embargo, solo los dispositivos que son parte del grupo de multicast recibirán los paquetes de datos.

### **5.2.2.3 Transmisión unicast**

La transmisión de unicast de ZigBee está siempre dirigida por la dirección de 16 bits del dispositivo destino. Sin embargo, sólo la dirección de 64 bits de un dispositivo es permanente; la dirección de 16 bits puede cambiar. Por lo tanto, los dispositivos ZigBee pueden emplear el descubrimiento de dirección de red para identificar la dirección de 16 bits actuales que corresponden a una dirección conocida de 64 bits, y descubrir la ruta para establecer un trayecto.

### **5.2.3 Descubrimiento de dirección de red**

La transmisión de datos es siempre enviada a la dirección de red de 16 bits del dispositivo destino. Sin embargo, la dirección de 64 bits es única en cada dispositivo y es generalmente conocida, y los dispositivos ZigBee deben descubrir la dirección de red que le fue asignada a cada dispositivo en particular cuando éste se unió a la PAN, es decir, a una red de área personal, antes de que pueda transmitir datos.

Para esto, un dispositivo envía una transmisión de broadcast de descubrimiento de dirección de red a través de la red. Estos paquetes contienen la dirección de 64 bits del dispositivo que el iniciador requiere para enviarle los datos. Los dispositivos que reciben esta transmisión broadcast verifican si sus 64 bits de dirección coinciden con la dirección de 64 bits contenida en la transmisión de broadcast. Si la dirección coincide, los dispositivos envían un paquete de regreso respondiéndole al iniciador, proporcionándole la dirección de red del dispositivo. Cuando esta respuesta es recibida, el iniciador puede entonces transmitir datos.

#### **5.2.4 Algoritmo de ruteo AODV**

ZigBee emplea el ruteo de malla para establecer una ruta entre los dispositivos fuente y destino. El ruteo de malla permite a los paquetes de datos atravesar múltiples nodos (hops) en una red para rutear datos de una fuente a un destino, ver Figura 5.11. Los routers y coordinadores pueden participar en el establecimiento de rutas entre dispositivos fuente y destino mediante un proceso denominado descubrimiento de ruta, *route discovery*, éste proceso está basado en protocolo AODV (*Ad-hoc On-demand Distance Vector routing*).

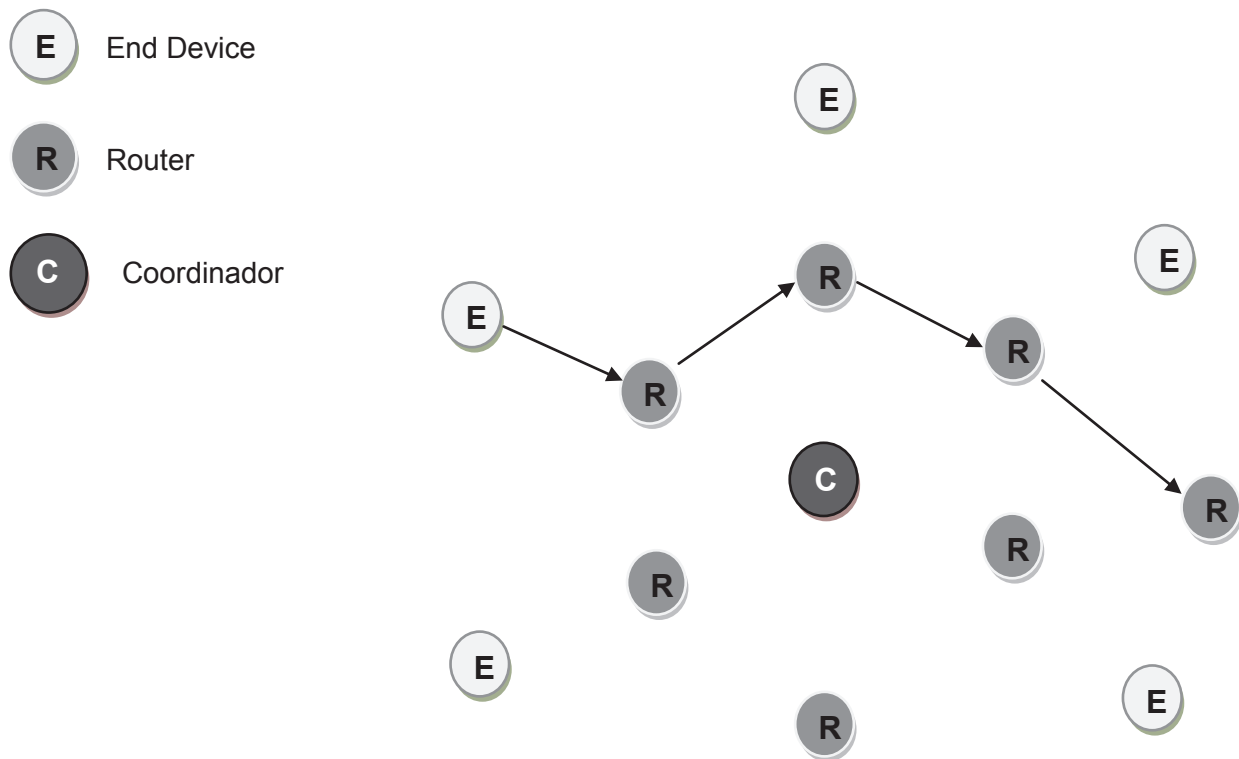


Figura 5.11 Ejemplo de una transmisión a través de la red de malla

El ruteo conforme al protocolo AODV se lleva a cabo utilizando tablas en cada nodo en las cuales se almacena el siguiente salto para un nodo destino, un nodo puede ser intermediario entre nodos de origen y destino. Si el siguiente salto no se conoce, la ruta de descubrimiento debe llevarse a cabo con el fin de encontrar un trayecto. Dado que sólo un número limitado de rutas puede ser almacenado en un router, la ruta de descubrimiento se llevará a cabo más a menudo en una red amplia con una comunicación entre numerosos nodos.

Por ejemplo de la Figura 5.12 el router R3 trata de descubrir una ruta con el router R6, una trayectoria sería como lo muestra la Tabla 5.1, en la que vemos cuales serían los próximos saltos entre los nodos para llegar del origen al destino.

Nodo	Dirección Destino	Dirección de próximo salto
R3	Router 6	Coordinador
C	Router 6	Router 5
R5	Router 6	Router 6

Tabla 5.1

Cuando un nodo origen debe descubrir una ruta o un nodo destino, este envía por broadcast un comando de *solicitud de ruta (route request)*, ver Figura 5.12. El comando de *solicitud de ruta* contiene la dirección de red del nodo origen, dirección de red de nodo destino y un costo de trayectoria de campo (una métrica para medir la calidad de la ruta). Como el comando de petición de ruta es propagado a través de la red (refiriéndose a una transmisión broadcast), cada nodo retransmite el mensaje actualizado con el costo de trayectoria de campo y crea una entrada temporal en su tabla de descubrimiento de ruta.

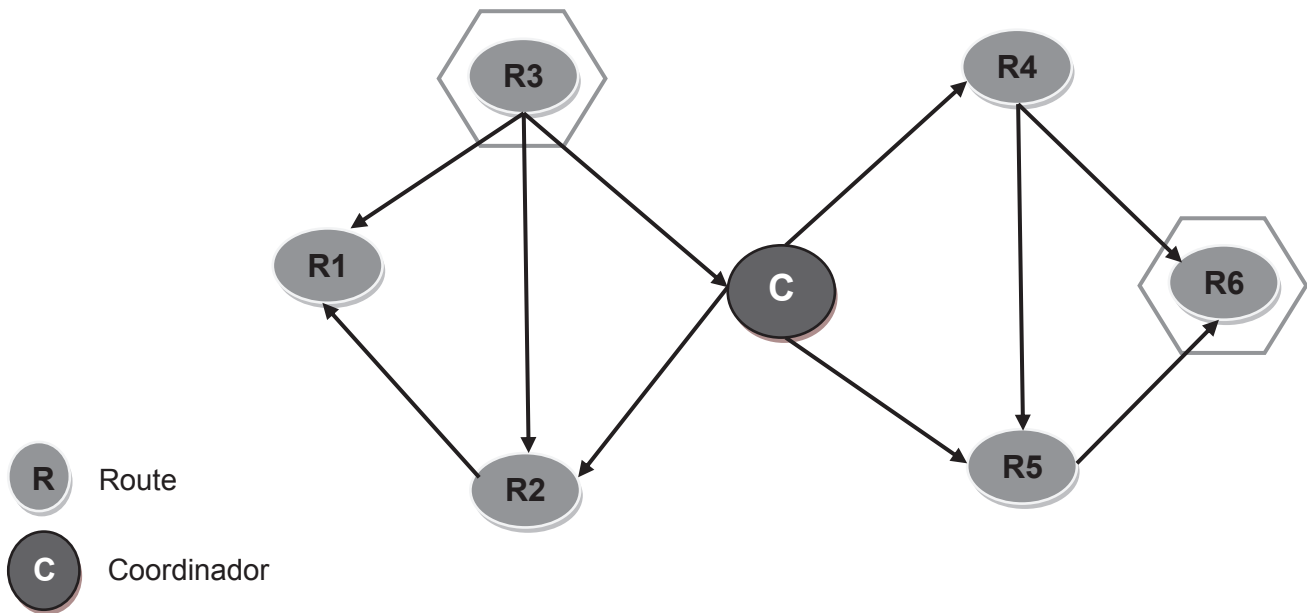
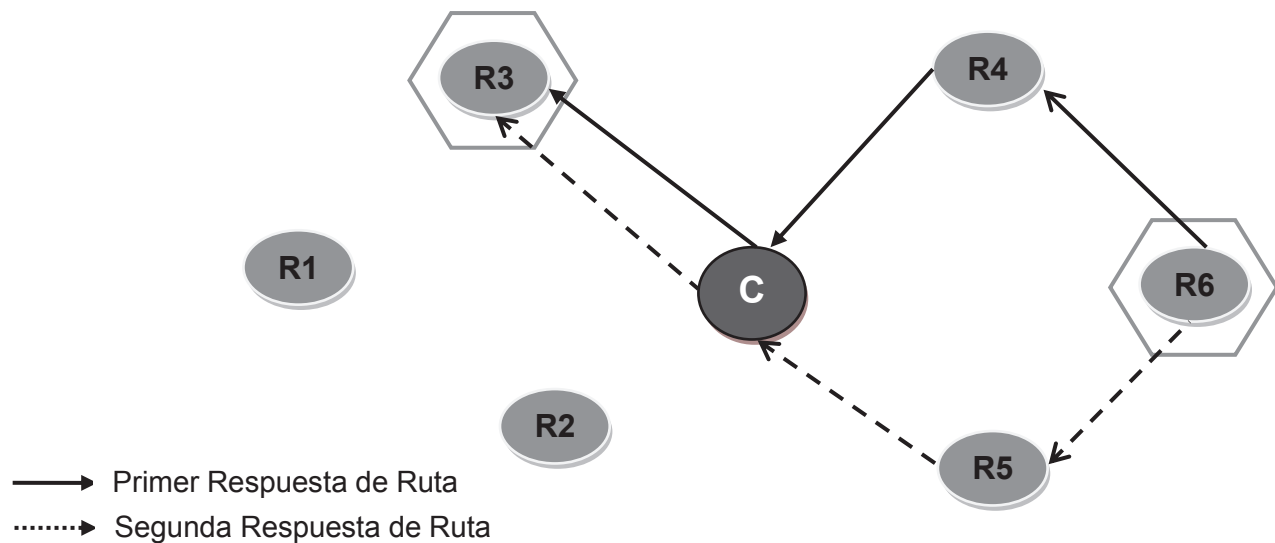


Figura 5.12 Ejemplo de solicitud de ruta (transmisión broadcast), donde R3 trata de descubrir una ruta para R6

Cuando el nodo destino recibe una *solicitud de ruta*, compara el 'costo de trayectoria' de campo contra el comando de *solicitud de ruta* recibido previamente. Si el costo de trayectoria almacenado en la petición de ruta es mejor que cualquiera recibido previamente, el *nodo destino* transmitirá un paquete llamado *respuesta de ruta (route reply)* a el nodo que originó la petición de ruta. Los nodos intermedios reciben y reenvían el paquete de *respuesta de ruta* al nodo origen, es decir el nodo que originó la petición de ruta. La Figura 5.13 nos muestra un ejemplo de dos *respuestas de ruta* que llegan del router R6 al router R3, éste último se encargará de tomar la decisión de cual será el mejor trayecto a tomar.



Nota: R6 puede enviar múltiples respuestas si identifica una mejor ruta

Figura 5.13 Ejemplo de respuesta de ruta donde R6 envía una respuesta de ruta a R3

### 5.3 Análisis del desempeño de la red y nodo sensor

Para esta parte primero se recurrirá a otra herramientas con la que cuentan los módulos XBee, el RSSI (*Received Signal Strength Indicator*), después se calcularan las pérdidas por trayectoria mediante un modelo empírico, y finalmente se realizará una prueba que determine cuantos paquetes llegan de un *nodo fuente* a un *nodo destino* en condiciones similares a las que tendrán los nodos, como son: encontrarse en un ambiente externo, el constante flujo de automóviles y algunas personas, por mencionar algunos.

### 5.3.1 Modelo empírico para WLAN

La información que viaja a través del medio ambiente entre dos antenas sufre pérdidas por trayectoria, *Path Loss*, actualmente existen varios modelos que predicen éstas pérdidas, algunos factores que se toman en cuenta son la frecuencia, el tipo de suelo, las paredes que se atraviesan, si los receptores son móviles, si se encuentran en zonas urbanas o rurales, entre otros. Los modelos están clasificados según su cobertura de área geográfica, *macrocelas*, *microcelas* y *picocelas*, las WLAN se encuentran dentro de las *picocelas* que principalmente operan en ambientes *indoor*.

El modelo que se empleará es para uso en frecuencias alrededor de 2.4 y 5.2 GHz, es un modelo de propagación optimizado basado en técnicas de medición y que evalúa el rendimiento de la red en un ambiente interior [1].

Su forma general es:

$$Loss_{|dB|} = k_1 + G_u + k_2 \log(f) + k_3 \log(R) + n_W [k_4 P1 + k_5 P2] + k_6 m_F \quad (1)$$

Donde  $G_u$  representa la ganancia de las antenas,  $f$  es la operación de frecuencia,  $R$  es la distancia de propagación,  $P1$  y  $P2$  son asociados con el ángulo de incidencia a un muro,  $n_W$  y  $m_F$  son el número de muros y el número de pisos que se localizan entre el transmisor y el receptor. En el caso de tener línea de vista (*line-of-sight*, LOS), sólo los primeros cuatro términos se emplean. [1]

Para optimizar los coeficientes se emplean cuatro modelos para  $P1$  y  $P2$  en (1) y basándose en datos de medición se obtiene la siguiente formulación [1]:

$$Loss_{|dB|} = 19.07 + 36.3 \log(f_{GHz}) + 18.3 \log(R_m) + n_W [21 \text{sen}\theta + 12.2(1 - \text{sen}\theta)] + 8.6m_F \quad (2)$$

Dado que las condiciones de los nodos no son en ambiente de interiores, pero sí en exteriores, se realizó una grafica que muestra el caso en el que se considera que se tiene línea de vista entre nodos, para lo cual sólo se consideraron los tres primeros términos de la ecuación (2) y el caso en el que no se tendrá línea de vista entre nodos, NLOS, la ecuación (2) en su totalidad, ver Figura 5.14.

Los parámetros utilizados fueron una frecuencia de 2.45 GHz, una distancia de 100 metros, un muro y un piso entre el transmisor y el receptor. El muro propuesto se consideró ya que habrá momentos en los que la señal encontrará obstáculos, vehículos principalmente, y el piso debido a que los nodos sensores se encontraran casi a nivel de piso, con una variación entre 50 centímetros y 1 metro.

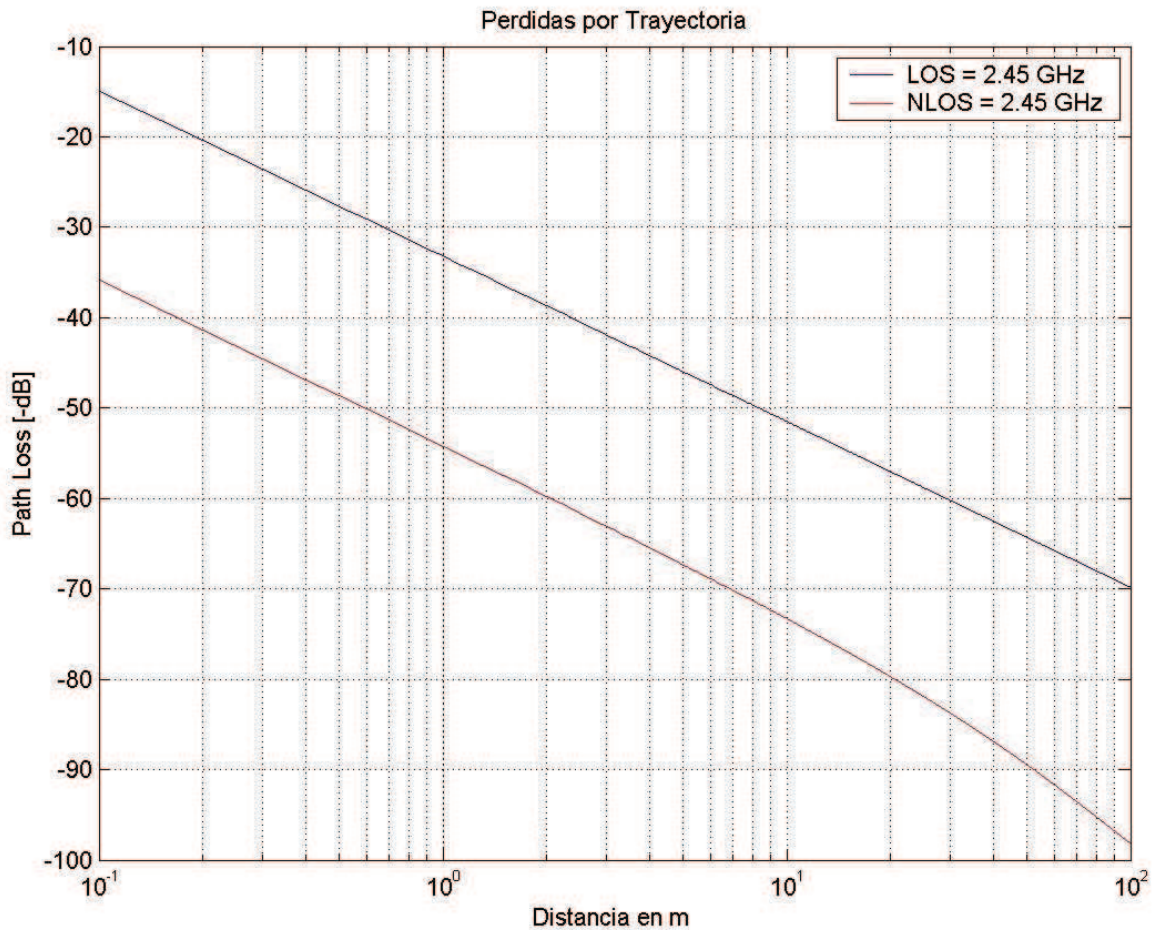


Figura 5.14 Perdidas por Trayectoria, Modelo TUAN

La Figura 5.14 muestra las pérdidas de potencia de la señal que se presentan de una antena transmisora a una antena receptora, con y sin línea de vista, conforme la distancia aumenta. Para el caso en el que se tienen 2 nodos a una distancia de 10m observamos una pérdida de potencia de -52dBm y -74dBm, las hojas de especificaciones de los módulos XBee nos marcan una sensibilidad del receptor de -96dBm, por lo cual, que con las pérdidas

mostradas, se garantizan que se tendrá cobertura en el enlace entre transmisor y receptor debido a que los valores obtenidos son menores al mínimo requerido.

### 5.3.2 RSSI

Para comprobar que los resultados calculados de las pérdidas por propagación son similares a las pérdidas reales en los nodos, se tomaron muestras de la intensidad de la señal recibida en un receptor mediante el indicador de intensidad de señal recibida, RSSI, los valores que reporta van de  $-26dBm$  a  $-92dBm$ .

Para el primer caso se consideró línea de vista entre antenas, LOS, y se fue variando la distancia cada 12 metros, el segundo caso es para el que no se tiene línea de vista, NLOS, y la distancia varió cada 5 metros, ver Figura 5.15.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> La prueba se realizó una vez para cada caso.

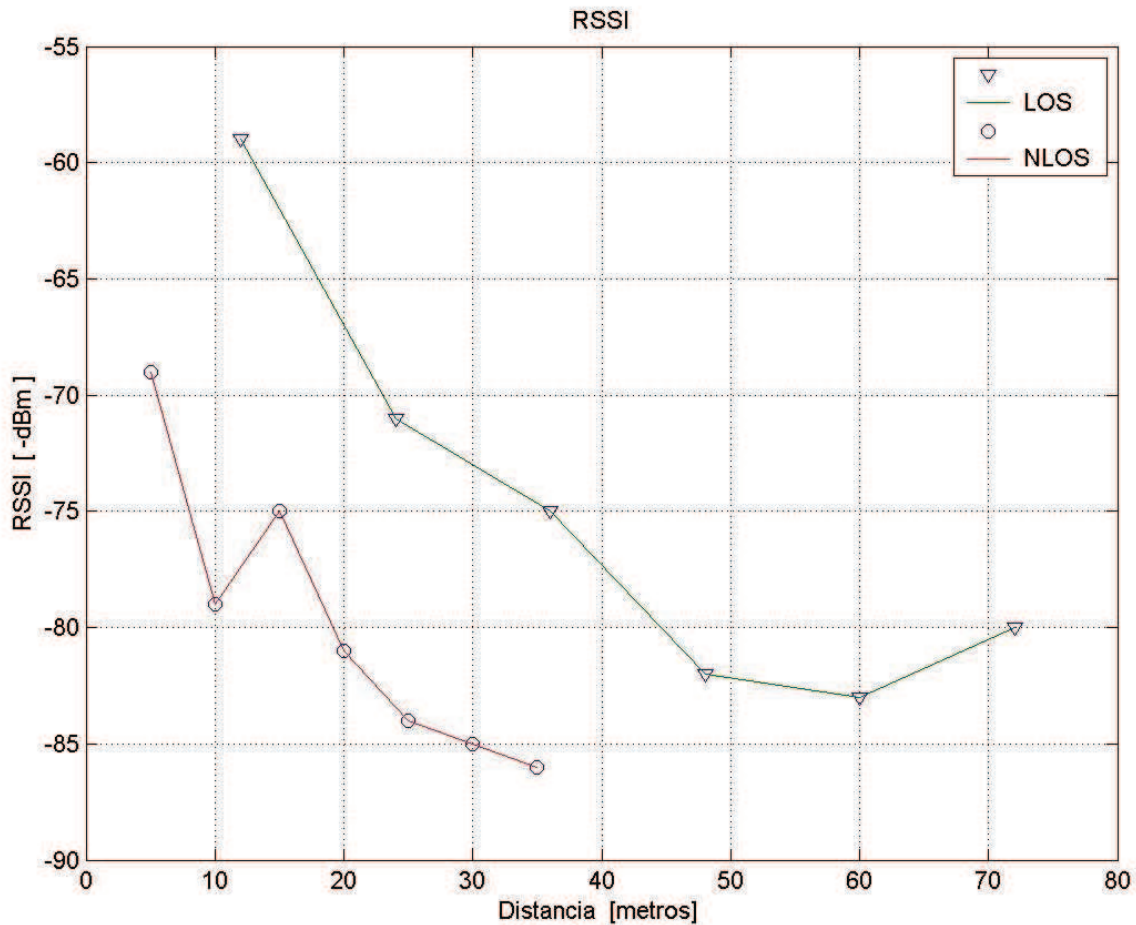


Figura 5.15 Valor de RSSI vs distancia

En la Figura 5.15 podemos observar que se tienen mayores pérdidas de propagación cuando se tienen obstáculos y la distancia aumenta. Las condiciones en las que se encontraban las antenas fueron muy similares a las condiciones en la que estarán los sensores, un estacionamiento vehicular. Para el caso en el que no se tiene línea de vista, cada que se tomó una muestra se encontraba un automóvil, para el ambiente en el que se encontrarán los nodos éste será el principal obstáculo.

### 5.3.3 Contador de Datos Transmitidos

Para determinar que la información que se envía de un nodo a otro será recibida en su totalidad, se realizó un programa que se encarga de enviar 100 paquetes y cada paquete va numerado, para poder visualizar la información se requirió de una terminal en la computadora y posteriormente ésta información se exportó a un archivo de Excel para su análisis.

La prueba que se realizó constó de enviar 9 bloques de 100 paquetes cada uno, sabemos que la información que envié un nodo sensor al coordinador tendrá varios saltos de nodos por lo que para que la prueba fuera más allegada a la realidad la información enviada se efectuó con el salto de dos nodos, los datos obtenidos fueron los siguientes, ver Tabla 5.2.

BLOQUE	PAQUETES RECIBIDOS
1	100
2	64
3	38
4	100
5	100
6	85
7	100
8	100
9	90
<b>PROMEDIO</b>	<b>86.33</b>

Tabla 5.2

La tabla 5.2 nos muestra la cantidad de bloques enviados y el promedio de los paquetes recibidos. Cabe decir que en el envío de paquetes del bloque 2, se presentó un error en el nodo y por lo tanto no se obtuvo la información completa de todos los paquetes. El promedio obtenido de paquetes recibidos equivale a 86.33% lo cual nos indica que de 100 paquetes enviados tenemos la certeza de que 86 serán recibidos satisfactoriamente.

#### **5.3.4 Resultados en cuanto a distancia**

Algunos de los resultados obtenidos de manera exitosa durante los experimentos fueron el hecho de alcanzar cada vez distancias más largas. En un principio solamente se tenía la comunicación entre dos módulos, después para incrementar la distancia, la información saltó primero un nodo y después dos nodos logrando una distancia mayor a 100 metros sin tener línea de vista entre módulos. La Figura 5.16 muestra una imagen satelital del plantel de San Lorenzo Tezonco en donde se realizaron las pruebas, el coordinador se encontraba dentro del laboratorio en el primer piso del edificio C, los routers nombrados R1, R2 y R3 se colocaron a diferentes distancias sin línea de vista entre ellos; para darnos una idea de la distancia recorrida, se tomó la línea de medición del mapa que nos indica una distancia de 50 metros.

Por lo tanto, el envío de información salto de la siguiente manera: de R1 a R2, de R2 a R3 y de R3 a C. El coordinador se encontraba conectado a una computadora que nos permitía ver con apoyo del software X-CTU la recepción de datos, ver Figura 5.17. Cada nodo mandó su número de ROUTER.

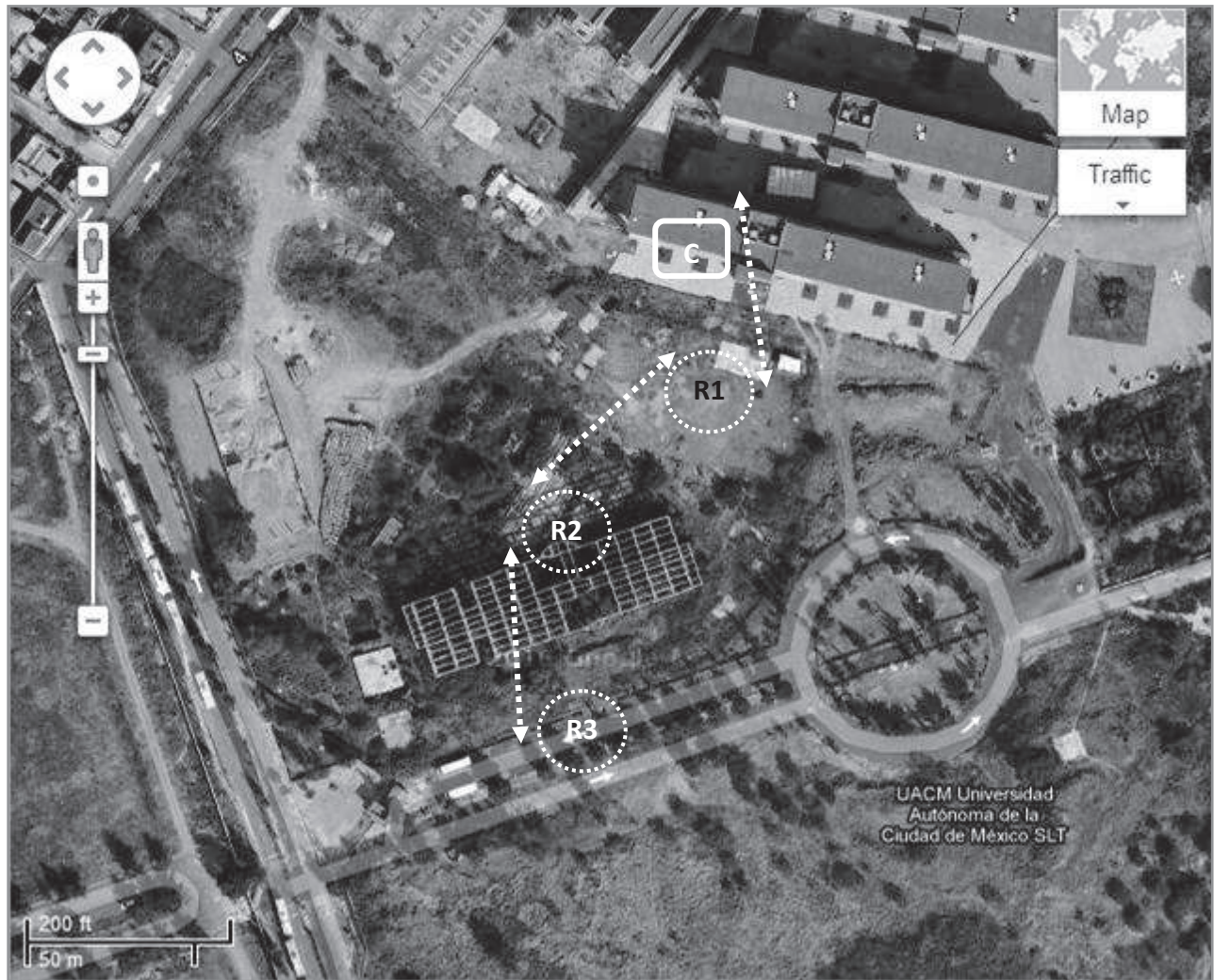


Figura 5.16 Mapa Aéreo de la colocación de los nodos en el Plantel San Lorenzo Tezonco.



## Referencias

[1] Shih-Chung Tuan\*, J.-C. Chen, H.-T. Chou and H.-H. Chou, Optimization of Propagation Models for the Radio Performance Evaluation of Wireless Local Area Network. Antennas and Propagation Society International Symposium, Vol. 2. pp. 146-148, IEEE. 2003.

RFC 3561 AODV, Ad-hoc On-demand Distance Vector routing, 2003.

MaxStream, hojas de especificaciones de XBee™ Series 2 OEM RF Modules.

### Conclusiones

El diseño e implementación de redes inalámbricas de sensores está tomando gran relevancia ya que es posible crear una red de dispositivos que se comunican entre sí, capturan constantemente determinada información, la registran y almacenan para posteriormente procesarla, lo cual permite monitorear complejos sistemas, logrando así automatizar diversos aspectos de la vida cotidiana o de la industria.

Con el trabajo realizado en esta tesis y considerando el proceso de desarrollo, se concluye que es posible implementar una red inalámbrica de sensores con tecnología ZigBee para la automatización de pruebas de pericia de manejo y obtener datos de ingeniería de tránsito en tiempo real de manera exitosa.

Se puede afirmar que, para este proyecto, el protocolo ZigBee, que presenta una baja tasa de datos y un corto alcance, representó una ventaja dado que la información a transmitir por parte de los sensores consta de sólo algunos bytes, ya que se transmite

texto, y la distancia que se requiere entre nodos no es mayor a 30 metros además que al colocar los nodos en una topología de tipo malla se puede alcanzar la distancia necesaria. Es importante resaltarlo ya que en una primera estancia podría pensarse que es una desventaja ya que esto va contra corriente en las tendencias de las WLAN.

En cuanto a los módulos XBee del fabricante Digi podemos mencionar que las ventajas que presenta son: una interfaz sencilla para la programación de los módulos utilizando una comunicación serial por puerto RS-232 o por USB, el uso de comandos AT lo cual nos permite utilizar una hyperterminal para la programación, además de que el fabricante proporciona un software gratuito disponible en su página web, lo que hace más amigable la programación de los mismos. Por otro lado, si un microprocesador contiene UART se puede tener una interfaz de comunicación entre éste y un módulo XBee, debido a eso no es necesario estar conectado a una computadora para la configuración y para el manejo en el envío de información, logrando una mayor autonomía. Por último, a consecuencia de esto, se pudieron diseñar los nodos sensores que nos permiten tener un mayor control de los módulos y así poder utilizar los sensores que se consideren más adecuados. Por otro lado, una desventaja, es el hecho de que estos módulos cuenten con pines para entradas analógicas y digitales haciendo que su precio se eleve ya que el fabricante invirtió en materiales, diseño y desarrollo de software; sin embargo, para el caso de este trabajo, estos pines quedaron en desuso.

El hecho de usar tecnología de bajo consumo de potencia nos permite utilizar baterías, haciendo posible obtener sistemas portátiles y autónomos, sin dejar de mencionar que se

ahorra energía. En un principio podría parecer que el costo es más elevado con respecto a un sistema cableado ya que se tiene que invertir en los módulos XBee y en las baterías, sin embargo, si el sistema se hubiera implementado con una red guiada el costo habría sido en su momento relativamente igual tomando en cuenta la opción de guiar el cableado de manera subterránea se requiere perforar y canalizar de manera robusta o la opción de guiar los cables de manera externa que requiere colocar postes. Además, en la opción cableada, sería necesario desembocar todos los nodos en un switch y enviar la información a un destino para su análisis usando un determinado protocolo; así mismo tampoco podemos dejar de lado el hecho de las implicaciones que conllevarían el requerir más nodos en un futuro. Una ventaja de contar con una red inalámbrica es no se requiere invertir en infraestructura o es mu poca y se vuelve muy fácil agregar la cantidad de nodos que se requieran.

Una de las mejoras que se pueden hacer al sistema sería adquirir módulos con tecnología ZigBee que sólo se limiten a enviar y transmitir información, lo que reduciría costos y se diseñarían nodos sensores de menor tamaño. Otra sería automatizar parte de las pruebas en las que se requiere de un reclutador para asegurar de que se cumplan ciertos requisitos en las pruebas como es el número de movimientos permitidos en la prueba de estacionamiento en paralelo, por mencionar alguno.

El impacto que representa este trabajo es que al automatizar las pruebas de pericia la Ciudad de México podrá emitir licencias de manejo que manifiesten que la persona está capacitada para maniobrar vehículos automotores con lo que se incrementará la calidad

del tránsito vehicular y se verán reducidos los accidentes viales. También con esta automatización se obtienen resultados más confiables de las pruebas y se reduce la corrupción entre el evaluado y los aplicadores. Además cabe señalar que en el país ningún estado tiene un circuito vial o espacio para pruebas de pericia que se encuentre automatizado, por lo que es una propuesta innovadora.

Algunas de las cosas que se pueden mencionar con respecto al proyecto realizado es que en un futuro, al seguir trabajando en éste, se conseguirán nuevas ideas y el desempeño será más eficiente al ir identificando fallas y proponiendo mejoras, se optimizará la forma de comunicación y se ideará la manera de ir sustituyendo personal como los reclutadores quienes son los encargados de corroborar ciertos requisitos.

Otro aspecto es con respecto al tipo de tecnología, es que la ZigBee Alliance considera que ésta tecnología estará integrada en diversos aparatos electrónicos, uno de ellos los teléfonos móviles, considerando el auge de éstos al día de hoy y la evolución que se está presentando en sus sistemas operativos, se puede vislumbrar un amplio desarrollo de aplicaciones.

Con el logro de esta automatización se puede motivar y despertar el interés para automatizar cualquier otro tipo de rutinas o pruebas que requieran de esta tecnología.