



# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación**

**“SISTEMA PROTOTIPO DE POSICIONAMIENTO LOCAL  
DESTINADO A LA BÚSQUEDA DE LIBROS UTILIZANDO  
TECNOLOGÍA ZIGBEE”**

**INFORME DE PROYECTO DE GRADUACIÓN**

Previa a la obtención del Título de:

**INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

Presentado por

Cecilia Isabel Reyes Peñafiel

Guayaquil - Ecuador

2011

# AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios y a María Inmaculada por las bendiciones recibidas y su compañía durante mi vida estudiantil.

A mis profesores, MSc. César Martín Moreno, MSc. Miguel Yapur, MSc. Síxifo Falcones e Ing. Carlos Salazar, por brindarme su apoyo incondicional.

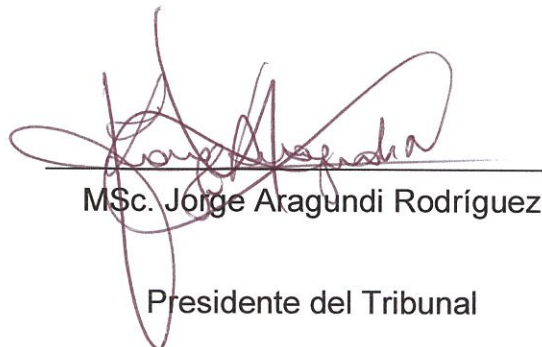
A mis compañeros de trabajo de la empresa CORPSAE y a mi director Ing. Jorge Hernández por ofrecerme su ayuda profesional y facilitarme el uso de sus equipos.

A los ayudantes que conforman la Biblioteca FIEC.

# DEDICATORIA


Mi entrega y dedicación al desarrollo de este proyecto lo dedico completamente a mis amados padres Colón y Mariana, por su esfuerzo y sacrificio para darme la mejor educación, por tener fe en mi y por haberme inculcado desde pequeña los valores fundamentales para llegar a ser lo que ahora soy, ustedes son el motor de mi vida.

# TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN



---

MSc. Jorge Aragundi Rodríguez  
Presidente del Tribunal



---

MSc. César Martín Moreno

Director de Proyecto



---

MSc. Carlos Valdivieso Armendáriz

Miembro Principal

# DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de este Proyecto de Graduación, me corresponde exclusivamente; Y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

  
Cecilia Isabel Reyes Peñafield



**CIB - ESPOL**

# RESUMEN

La Biblioteca de la Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación posee una importante cantidad de libros que están a disposición de los estudiantes. Ésta cuenta con una base de datos que contiene las características principales de cada uno de sus libros, una de ellas es la ubicación del perchero donde se lo podría encontrar. En ciertos casos esta ubicación es errónea debido a que los libros no están en su posición correcta, conllevando a un desorden, por lo que se quiere plantear una solución a este problema y tratar de ubicar los libros en tiempo real.

En el capítulo 1 se explica una breve reseña de la evolución de la biblioteca, quienes fueron sus directores, cuáles fueron los cambios que ellos realizaron para mejorar la calidad de la misma y cuál es el problema existente con respecto a la búsqueda de un libro.

La parte teórica de este informe corresponde al capítulo 2. En éste se explica las diferencias entre el sistema GPS y LPS. También se explican las diferentes opciones tecnológicas a las que se puede recurrir para la realización de este proyecto, sus bondades, sus desventajas y aplicaciones en general. Finalmente se explicará detalladamente el porqué se decidió a ZigBee como alternativa

tecnológica para el desarrollo del prototipo y cuál es el método matemático que se emplea para la búsqueda.

Luego de conocer la tecnología a usarse, es importante conocer los fundamentos en los que se basará el desarrollo del sistema de posicionamiento local. En el capítulo 3 se explicará cuales fueron los diferentes criterios para el diseño de la red Inalámbrica ZigBee y su plan de prueba, cuáles serán sus componentes electrónicos, su respectivo consumo de potencia y cómo será el envío de información en mencionada red.

Finalmente, en el capítulo 4 se mostrarán tablas con los resultados obtenidos en las diferentes pruebas y su análisis de efectividad. Como información importante, también se detallará el tiempo de vida que tendrá cada módulo.

# ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL

ABREVIATURAS

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS

INTRODUCCIÓN

1.	SITUACIÓN ACTUAL DE LA BIBLIOTECA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN (FIEC) .....	1
1.1	BREVE RESEÑA DE CAMBIOS QUE SE HAN DADO EN LA BIBLIOTECA FIEC .....	3
1.2	DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA EXISTENTE EN LA BIBLIOTECA CON RESPECTO A LA BÚSQUEDA DE LIBROS Y DEMÁS DOCUMENTOS .....	6
2.	DISEÑO E INTRODUCCION AL DESARROLLO DEL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO LOCAL .....	7



2.1	INTRODUCCIÓN AL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO LOCAL (LPS)	8
2.2	MÉTODOS PARA DESARROLLAR UN SISTEMA DE POSICIONAMIENTO LOCAL .....	11
2.2.1.	PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICA PARA TELEMETRÍA.....	37
2.2.2.	TABLA COMPARATIVA DE LOS MÉTODOS DE LPS .....	40
2.3	INTRODUCCIÓN A TECNOLOGIA ZIGBEE .....	42
2.4	MÉTODO MATEMÁTICO DE LOCALIZACIÓN EN DOS DIMENSIONES .....	57
3.	DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN ELECTRÓNICA DEL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO LOCAL .....	61
3.1	BASES PARA EL DESARROLLO DEL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO LOCAL .....	62
3.2.	DISEÑO DE LA RED INALÁMBRICA ZIGBEE .....	64
3.3.	DESARROLLO ELECTRÓNICO DEL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO LOCAL .....	68
3.3.1	COMPONENTES ELECTRÓNICOS PARA EL DESARROLLO.....	72
3.3.2	SISTEMA RECEPTOR.....	74

3.3.3	SISTEMA DE INTERFAZ PC – MODULO RECEPTOR.....	80
3.3.4	SISTEMA DE POTENCIA .....	88
3.4	DISEÑO DEL PLAN DE PRUEBAS .....	89
3.5	IMPLEMENTACION COMPLETA DEL SISTEMA .....	91
3.5.1	CÁLCULO DE LA POSICIÓN.....	91
3.5.2	ENVIO DE DATOS EN LA RED ZIGBEE.....	99
4.	RESULTADOS OBTENIDOS.....	107
4.1	MEDICIONES OBTENIDAS EN LAS DIFERENTES PRUEBAS .....	108
4.2	EFFECTIVIDAD DE LOS DATOS OBTENIDOS POR EL SISTEMA....	124
4.3	ESTIMACIÓN DE LA POTENCIA CONSUMIDA POR EL SISTEMA .	125
4.3.1	CONSUMO DE POTENCIA DE LOS COMPONENTES .....	126
4.3.2	ESTIMACIÓN DEL TIEMPO DE VIDA DE LOS MÓDULOS .....	127

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

ANEXOS

BIBLIOGRAFÍA

# ABREVIATURAS

<b>LPS</b>	Local Positioning Service
<b>GPS</b>	Global Positioning Service
<b>TI</b>	Texas Instruments
<b>WPAN</b>	Wireless Personal Area Network
<b>WiFi</b>	Wireless Fidelity
<b>RF</b>	Radio Frequency
<b>RFID</b>	Radio Frequency Identification
<b>GFSK</b>	Gaussian Frequency Shift Keying
<b>LAN</b>	Local Area Network
<b>WLAN</b>	Wireless Local Area Network
<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronics Engineers
<b>BSS</b>	Basic Service Set
<b>SWAP</b>	Shared Wireless Access Point

<b>UWB</b>	Ultra-Wide Band
<b>PAN</b>	Personal Area Network
<b>WiMAX</b>	WorldWide Interoperability for Microwave Access
<b>OSI</b>	Open System Interconnect
<b>PHY</b>	Physical
<b>NWK</b>	Network
<b>QoS</b>	Quality of Service
<b>TDMA</b>	Time Division Multiple Access
<b>MAC</b>	Media Access Control
<b>ZDO</b>	ZigBee Device Objects
<b>BPSK</b>	Binary Phase Shift Keying
<b>ISM</b>	Industrial, Scientific & Medical
<b>O-QPSK</b>	Offset Quadrature Phase Shift Keying
<b>FFD</b>	Full-function devices
<b>RFD</b>	Reduced-function device

<b>CSMA – CA</b>	Carrier Sense Multiple Access - Collision Avoidance
<b>GTS</b>	Granted Time Slot
<b>RSSI</b>	Receive Signal Strength Indicator
<b>SMD</b>	Surface Mounted Device
<b>FHSS</b>	Frequency Hopping Spread Spectrum
<b>DSSS</b>	Direct Sequence Spread Spectrum

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Constelación de satélites GPS.....	9
Figura 2. 2 Nodos en una red .....	12
Figura 2. 3 Ejemplo de triangulación.....	15
Figura 2. 4 Ejemplo de trilateración .....	16
Figura 2.5 Rejilla estática que recubre todo el entorno de trabajo .....	18
Figura 2.6 Esquema de un dispositivo Bluetooth genérico .....	20
Figura 2. 7 Picocelda Bluetooth .....	21
Figura 2.8 Componentes de una red IEEE 802.11 .....	23
Figura 2.9 Configuración ad-hoc.....	24
Figura 2. 10 Configuración Punto de Acceso.....	25
Figura 2. 11 Red HomeRF .....	27
Figura 2.12 Mesh Networking .....	29
Figura 2. 13 Espectro de frecuencias UWB.....	31
Figura 2. 14 (a) Estructura de una piconet UWB; (b) Supertrama UWB .....	32
Figura 2. 15 Arquitectura RFID .....	35
Figura 2. 16 Aplicaciones RFID .....	36
Figura 2. 17 Capas de Red del protocolo Inalámbrico ZigBee.....	45
Figura 2. 18 Clasificación de dispositivos Zigbee .....	49
Figura 2. 19 Topología estrella .....	51

Figura 2. 20 Ejemplos de topología Punto a Punto.....	52
Figura 2. 21 Topología tipo árbol Zigbee .....	53
Figura 2. 22 Diversos campos de aplicación ZigBee .....	56
Figura 2. 23 Método de Trilateración .....	58
Figura 3. 1 Diagrama de la red inalámbrica .....	65
Figura 3. 2 Ejemplo de red ZigBee usando topología de red Mesh .....	66
Figura 3. 3 Red inalámbrica con protocolo de acceso al medio CSMA/CA .....	67
Figura 3. 4 Sistema de Transmisión y Recepción en una antena.....	69
Figura 3. 5 Ejemplo de antena Dipolo.....	70
Figura 3. 6 Ejemplo de Antena Single Ended con su respectiva red balun.....	71
Figura 3. 7 Integrados de TI que ofrecen soluciones ZigBee .....	72
Figura 3. 8 Estructura de un SoC. ....	74
Figura 3. 9 Módulo CC2431 de Texas Instruments.....	75
Figura 3. 10 Esquemático del modulo CC2431 de Texas Instruments .....	77
Figura 3. 11 Diseño de fuente de 3.3V.....	81
Figura 3. 12 Diseño del módulo RS232 .....	83
Figura 3. 13 Diagrama general de la interfaz PC – módulos.....	84
Figura 3. 14 Pantalla del programa Z-Location Engine.....	86
Figura 3. 15 Actualización de la posición de los nodos.....	87
Figura 3. 16 Posicionamiento de módulos en la red ZigBee .....	87

Figura 3. 17	Ejemplo de Estimación de Posición.....	92
Figura 3. 18	Operación de localización .....	96
Figura 3. 19	Comunicación Simplificada.....	100
Figura 3. 20	Trama del paquete “Envío de posición del módulo móvil”.....	102
Figura 3. 21	Comunicación entre nodos .....	104
Figura 3. 22	Configuración de nodos.....	105
Figura 3. 23	Configuración Nodos – Interfaz PC.....	106
Figura 4. 1	Imagen del área de trabajo de la Biblioteca FIEC.....	109
Figura 4. 2	Ubicación de nodos .....	111
Figura 4. 3	Prueba #1a .....	111
Figura 4. 4	Prueba #1b .....	112
Figura 4. 5	Prueba #1c.....	112
Figura 4. 6	Prueba #2a .....	112
Figura 4. 7	Prueba #2b .....	112
Figura 4. 8	Prueba #2c.....	113
Figura 4. 9	Prueba #3b .....	113
Figura 4. 10	Prueba #3a .....	113
Figura 4. 11	Prueba #3c.....	113
Figura 4. 12	Prueba #4a .....	114
Figura 4. 13	Prueba #4b .....	114



Figura 4. 14 Prueba #4c.....	114
Figura 4. 15 Prueba #5a .....	114
Figura 4. 16 Prueba #5b .....	115
Figura 4. 17 Prueba #5c.....	115
Figura 4. 18 Prueba #6a .....	115
Figura 4. 19 Prueba #6b .....	115
Figura 4. 20 Prueba #6c.....	116
Figura 4. 21 Prueba #7a .....	116
Figura 4. 22 Prueba #7b .....	116
Figura 4. 23 Prueba #7c.....	116
Figura 4. 24 Ubicación de nodos .....	118
Figura 4. 25 Prueba #8a .....	118
Figura 4. 26 Prueba #8b .....	119
Figura 4. 27 Prueba #8c.....	119
Figura 4. 28 Prueba #9a .....	119
Figura 4. 29 Prueba #9b .....	119
Figura 4. 30 Prueba #9c.....	120
Figura 4. 31 Prueba #10a .....	120
Figura 4. 32 Prueba #10b .....	120
Figura 4. 33 Prueba #10c.....	120

Figura 4. 34 Prueba #11a .....	121
Figura 4. 35 Prueba #11b .....	121
Figura 4. 36 Prueba #11c.....	121
Figura 4. 37 Prueba #12a .....	121
Figura 4. 38 Prueba #12b .....	122
Figura 4. 39 Prueba #12c.....	122
Figura 4. 40 Prueba #13a .....	122
Figura 4. 41 Prueba #13b .....	122
Figura 4. 42 Prueba #13c.....	123
Figura 4. 43 Prueba #14b .....	123
Figura 4. 44 Prueba #14a .....	123
Figura 4. 45 Prueba #14c.....	123
Figura 4. 46 Área de estudio de la Biblioteca FIEC .....	128

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1 Comparación de las diferentes tecnologías .....	42
Tabla 3. 1 Tabla de datos según el número de pruebas.....	90
Tabla 3. 2 Tabla de datos correspondiente al cálculo de error .....	91
Tabla 3. 3 Parámetros de entrada. ....	98
Tabla 3. 4 Salida del motor de posicionamiento .....	99
Tabla 3. 5 Tipos de paquetes.....	101
Tabla 4. 1 Pruebas con un nodo lejano y tres cercanos .....	111
Tabla 4. 2 Pruebas con cuatro nodos cercanos.....	118
Tabla 4. 3 Eficiencia de las pruebas .....	125

# INTRODUCCIÓN

El presente proyecto de graduación trata acerca de un sistema prototipo de búsqueda de libros en un área local. El área elegida para su desarrollo fue la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería en Electricidad y computación.

El problema presente en la biblioteca radica cuando un estudiante decide buscar un libro y éste no se encuentra en su correcta ubicación ya sea porque un estudiante anteriormente lo utilizó y no lo dejó en su debido lugar o porque el libro fue prestado a otro estudiante.

El correcto orden de la ubicación de libros debe ser lo ideal en una biblioteca. Lastimosamente en ella los libros no están en su debida ubicación debido a que los estudiantes los utilizan y los dejan en cualquier lugar. La búsqueda se vuelve entonces un problema para el ayudante de la biblioteca o para el estudiante que lo necesita. Debido a esta necesidad se justifica el desarrollo de un sistema prototipo de posicionamiento local para la búsqueda de libros en la biblioteca FIEC que facilitará el trabajo de las personas que los necesitan.

Los objetivos que se plantearon al inicio de este proyecto fueron:

- Desarrollar un prototipo de sistema de rastreo que sirva como alternativa tecnológica para la búsqueda en tiempo real de un libro dentro de la biblioteca FIEC
- Implementar y usar tecnología de posicionamiento local para abrir nuevas áreas de investigación, facilitar la búsqueda de objetos en áreas personales o lugares cerrados donde la tecnología GPS no funciona y desarrollar un sistema multipunto de comunicación que interactúe con los diferentes módulos.
- Utilizar un software que interactúe con el usuario y muestre con precisión la posición del libro a buscarse, ya sea que éste se encuentre en un lugar fijo o se encuentre en movimiento.

La importancia de este proyecto no solo se centra en la localización del libro sino también en el estudio y aplicación de la tecnología ZIGBEE, siendo ésta la base para el desarrollo de este proyecto.

Para el Desarrollo del Prototipo del sistema de posicionamiento local (LPS) es necesario tener en cuenta diferentes parámetros:

- Es necesario que los dispositivos LPS estén conectados inalámbricamente ya que van a estar en continuo movimiento
- Se enviará los datos de posicionamiento cada cierto periodo de tiempo.
- El dispositivo LPS se limitará al envío de datos concretos como la posición
- Deberá existir múltiples dispositivos LPS enviando información al mismo tiempo.
- Los datos serán graficados en una PC la misma que deberá estar conectada a la red del sistema de localización.

Según estos parámetros mencionados se va a utilizar el protocolo IEEE 802.15.4 (ZIGBEE). Esta es una alternativa nueva y económica de rastreo para áreas pequeñas o personales que utiliza sistemas estáticos de posicionamiento conjuntamente con el sistema móvil del libro para poder triangular su posición permitiendo también el dimensionamiento adecuado de la red para este tipo de aplicación.

El protocolo ZIGBEE envía la información necesaria entre varios dispositivos de manera inalámbrica, teniendo en cuenta la seguridad y control de flujo que este protocolo posee.

Para que el dispositivo triangule su posición se utilizará el método de “Triangulación por nivel de Señal (RSSI)”, el cual consiste en que el dispositivo triangulará su posición por medio de la intensidad de la señal de Radio Frecuencia (RF) que emitan los dispositivos que se encuentra a su alrededor.

Cuando el dispositivo móvil (libro) reciba la señal proveniente de los demás dispositivos fijos que se encuentre en su alrededor, éste por medio de la trilateración esférica (método para hallar la intersección de dos o varias ondas esféricas) obtendrá su posición el cual será enviado por los dispositivos adyacentes hasta la computadora para que sea graficada su información.

Hay que tener en cuenta que existirá un rango de error que dependerá de cuantos dispositivos fijos se encontraran en el medio para proporcionar la información necesaria al dispositivo móvil.

Para el desarrollo físico de este proyecto, se utilizara un módulo que contenga al chip CC2431 de Texas Instruments que se adecua a todas las características de desempeño que se ha mencionado con anterioridad, permitiendo el envío de datos por medio de una red ZIGBEE.

Para que la información sea visible de manera gráfica ésta deberá ser presentada en la computadora por lo cual uno de estos dispositivos con tecnología ZIGBEE deberá estar conectado directamente a la PC para recibir toda la información proveniente de los demás dispositivos de la red, para lograr este objetivo se diseñará e implementará una interfaz electrónica PC-Módulo con el fin de conectar el módulo receptor de señal.

Luego de la implementación y puesta a prueba del dispositivo para posicionamiento local se espera que el sistema muestre información en tiempo real de la ubicación de un objeto determinado con un rango de error mínimo. Se espera también que el método usado sea de ayuda para la implementación de nueva tecnología de telemetría en la ESPOL y que el campo de aplicación se amplíe con el desarrollo de proyectos de graduación orientados a tecnología ZIGBEE.



# **CAPÍTULO 1**

## **SITUACIÓN ACTUAL DE LA BIBLIOTECA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN (FIEC)**

Se conoce como biblioteca al organismo encargado de adquirir, ordenar y actualizar colecciones de libros, publicaciones, documentos gráficos o multimedia que están disponibles para ser consultados según la necesidad del usuario.

Es común encontrar una Biblioteca local cuando se visita una ciudad, pero también éstas están presentes en entidades educativas como colegios y universidades. Las razones por las que se visita una biblioteca dependen del usuario, uno de los motivos tradicionales de visita es el de realizar tareas de investigación.

Las universidades de prestigio y sus respectivas facultades dedican todo un edificio a la creación grandes bibliotecas. La Escuela Superior Politécnica del Litoral no es la excepción, ésta tiene su propio Centro Bibliotecario de Información. Asimismo la Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación posee su Centro Bibliotecario ubicado en el segundo piso del edificio 15A del Campus Prosperina.

Esta biblioteca está debidamente equipada, con mesas y cubículos de estudio, estanterías donde se pueden encontrar libros tanto de Ciclo Básico como de Especialización, también cuenta con Tesis de sus estudiantes y revistas técnicas.

## **1.1 BREVE RESEÑA DE CAMBIOS QUE SE HAN DADO EN LA BIBLIOTECA FIEC**

La biblioteca fue coordinada inicialmente por el Ing. Carlos Becerra y la Ing. Ludmila Gorenkova. Estaba localizada en el Campus Las Peñas en el segundo piso del departamento de Ingeniería Eléctrica, junto a la Fiscalía. Era un lugar pequeño que inicio con donaciones de libros y revistas técnicas por parte de profesores o estudiantes que recién se graduaban

Cuando se realizó el cambio de campus Las Peñas al campus Prosperina no se planificó un lugar específico para la biblioteca, por lo que se compartió el lugar físico de la asociación de estudiantes FIEC con la biblioteca. Los libros de uso común como los de Electrónica o Redes Eléctricas estaban al alcance mientras que el resto de libros, debido al espacio, estaban dentro de cartones. A partir del año 1993 el Ing. Miguel Yapur toma la dirección de la biblioteca. El hecho de compartir la biblioteca con la asociación de estudiantes era un problema debido a su reducido espacio y a su área inadecuada para el estudio.

Dándose cuenta de esa necesidad, en el año 1997 empezó la construcción de la biblioteca en el bloque 24A contando con la colaboración de libros y de muebles de oficina. Se clasificaron los libros como de uso común y de consulta, también

se clasificaron por especialización como electrónica y área básica. Las revistas técnicas anteriormente donadas fueron colocadas en archivadores y las tesis en estanterías. Una vez teniendo ordenada el área destinada para la biblioteca se procedió a su inauguración a finales del año 1998. Se donaron dos computadoras, una era para uso del ayudante encargado, para que llevara el registro de préstamo de libros y la otra fue destinada para uso de estudiantes que querían realizar sus trabajos de investigación. También se hicieron campañas para que tanto profesores como estudiantes siguieran colaborando con la donación de libros.

Ya en el año 2002 se entrega la dirección de la biblioteca a la Ing. Marisol Villacrés. Durante su gestión se actualizó la base de datos, con la que se trabaja hasta la fecha, agregando campos de información que volvían más sencilla la consulta y la clasificación del libro, por ejemplo a qué libro le correspondía estar en el área Básica (Cálculo, Física) o en el área General (materias FIEC). Aparte de prestar libros también se daban servicios como grabar CD's, mostrar publicaciones y venta del folleto de Laboratorio de Electrónica B, registrando cada servicio prestado tanto en el computador como en un talonario que era entregado al estudiante. Con el dinero recaudado se compraban stickers, CD's, insumos de oficina y se empastaban libros que estaban dañados. Por un semestre se creó el sistema BOOKTRADE, cuyo fin era comprar y vender libros

usados teniendo su propia página web cuyo link estaba en la pagina del METIS, pero debido a las fallas que tenía el sistema se opto por darle de baja.

Con la construcción del nuevo edificio de la facultad se decidió cambiar el lugar físico de la biblioteca trayendo al inicio algunos problemas como la falta de un lugar de estudio en semana de exámenes, pero la atención al estudiante se reanudó rápidamente. Se otorgó a la nueva biblioteca 4 computadoras con el sistema UBUNTU para el uso de estudiantes, pero algunos estudiantes, aprovechando la red inalámbrica, llevan sus laptops para realizar sus trabajos de investigación. También se dio la disposición que ya no se podía recibir dinero por prestación de servicios por lo tanto ya no se podían ofrecer los servicios adicionales mencionados anteriormente. Si un estudiante tenia deuda con la biblioteca, el ayudante lo comunicaba y la deuda aparecía en el sistema académico. Actualmente, la biblioteca se encuentra bajo la dirección del Ing. Carlos Salazar.

## **1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA EXISTENTE EN LA BIBLIOTECA CON RESPECTO A LA BÚSQUEDA DE LIBROS Y DEMÁS DOCUMENTOS**

La Biblioteca de la Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación posee una importante cantidad de libros, los cuales están a disposición de los estudiantes. Como se mencionó anteriormente, la biblioteca cuenta con una base de datos que contiene las características principales de cada uno de sus libros en la cual se detalla la ubicación del perchero donde se lo podría encontrar. En ciertos casos esta ubicación es errónea debido a que los libros son prestados ya sea dentro o fuera de la biblioteca lo que conlleva a un desorden.

El correcto orden de la ubicación de libros debe ser lo ideal en una biblioteca. Lastimosamente en ella los libros no están en su debida ubicación debido a que los estudiantes los utilizan y los dejan en cualquier lugar. La búsqueda se vuelve entonces un problema para el ayudante de la biblioteca o para el estudiante que lo necesita

Se quiere plantear una solución a este problema y tratar de ubicar los libros en tiempo real para evitar la búsqueda de libros que son importantes para el estudiante en el momento.

## **CAPÍTULO 2**

### **DISEÑO E INTRODUCCION AL DESARROLLO DEL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO LOCAL**

Los sistemas de posicionamiento externo, utilizando Sistemas de Posicionamiento Global (GPS) o técnicas que permiten medir la posición del usuario por medio de una red celular, han sido muy bien explorados y estandarizados. Pero GPS no trabaja en áreas internas y puede no dar la

exactitud que se necesita para moverse alrededor. Entonces es necesario buscar nuevas técnicas de determinar el posicionamiento de un objeto dentro de un área específica, para cerciorarse donde se encuentra y si está en la posición correcta. En este capítulo se tratará acerca de los sistemas de posicionamiento local, tecnologías existentes para el desarrollo de este tipo de sistemas y se profundizará en el estudio de la tecnología elegida para el desarrollo de este proyecto.

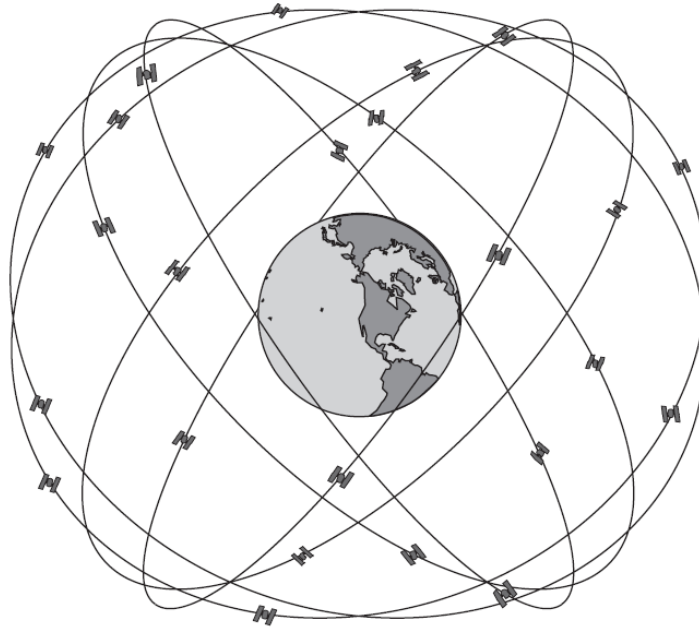
## **2.1. INTRODUCCIÓN AL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO LOCAL (LPS)**

El diccionario de la Real Academia Española (RAE) define a la palabra *localizar* como averiguar el lugar en que se halla alguien o algo y a la palabra *posición* como postura, actitud o modo en que alguien o algo está puesto.... Pero en el idioma inglés, *localize* y *position* se emplean de forma indistinta (así, se habla de Global Positioning System). De manera general se puede definir a *localización* como la determinación de relaciones espaciales entre objetos.

El líder en sistemas de posicionamiento es el llamado Sistema de posicionamiento Global o Global Positioning System (GPS). Éste es un sistema de navegación por satélite en el que se emplea una red de ordenadores y una



constelación de 24 satélites ubicados en la órbita geostacionaria de la tierra, para determinar posición en tres dimensiones de cualquier objeto que se encuentre en la superficie terrestre.



**Figura 2.1 Constelación de satélites GPS.**

Lastimosamente, este sistema tiene el inconveniente de no operar en entornos interiores debido a los grandes edificios y barreras arquitectónicas que debilitan considerablemente la señal de satélite, y es precisamente en estos lugares donde transcurre gran parte de la actividad humana.

Debido a la inaccesibilidad en estos entornos y como solución a este problema se ha desarrollado una serie de sistemas, la mayoría basados en sensores, que empleen la propagación de señales a corta distancia para determinar la ubicación del objeto con una precisión tal que llegue hasta la cobertura de la señal de corto alcance, obteniendo entonces un mejor rendimiento.

Es así como surge el Sistema de Posicionamiento Local. LPS, cuyas siglas en inglés significan Local Positioning System, es un sistema de localización alternativo diseñado para trabajar en áreas locales que utiliza sensores para rastrear exactamente un objeto dentro de un área localizada. Este tipo de sistemas rastrea un pequeño circuito electrónico, que es llevado por una persona o colocado en un objeto. La correcta construcción de un sistema de posicionamiento en entornos internos se vuelve un desafío porque las señales reflejadas de las paredes, pisos y techos tienden a confundir a los sensores, convirtiéndose en una obstrucción entre el sensor y el objeto a ser buscado.

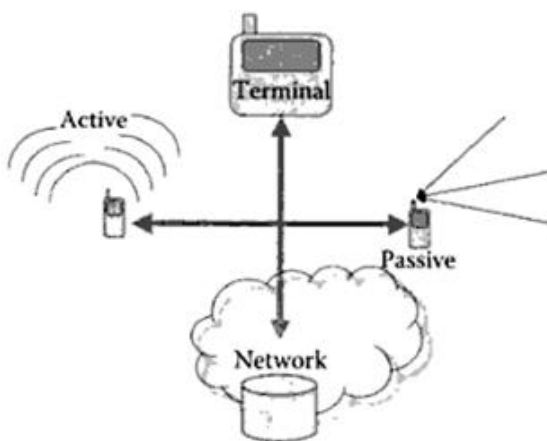
Estos sistemas en la actualidad se han vuelto más extensos debido a la viabilidad para construir dispositivos económicos y pequeños que permiten un alcance y posicionamiento preciso. Con el aumento de la precisión, los sistemas

de posicionamiento local están dando paso a la creación de nuevas aplicaciones en áreas como la geodésica, cuidados médicos, seguridad, entrenamiento militar, ofimática, gerencia de edificio inteligente donde los requisitos como la precisión y la confiabilidad son completamente estrictos, y en lugares muy concurridos como parques temáticos y museos donde se requiere búsqueda precisa de personas y objetos en tiempo real.

## **2.2 MÉTODOS PARA DESARROLLAR UN SISTEMA DE POSICIONAMIENTO LOCAL**

La base de cualquier sistema de posicionamiento es saber el lugar donde se encuentra el objeto y el algoritmo que calcula esa ubicación tomando como referencia un lugar conocido. Esto puede hacerse mediante la creación de una red cuyos nodos pueden ser activos o pasivos. Si son activos, transmiten una señal entre ellos y si son pasivos, se limitan a recibir la señal para después dejarla a otro ente para calcular la posición.

La mayoría de sistemas de posicionamiento global (GPS) son pasivos, simplemente reciben la señal puesto que no tendría mucho sentido comunicarse con todos los nodos de los satélites. Es importante recalcar que en éstos, no hay manera que el remitente sepa quién emplea la señal de posicionamiento. En cambio la mayoría de sistemas de posicionamiento local (LPS) son activos, puesto que se requiere enviar a cada instante una señal a las estaciones bases para asegurarse que el sistema no la haya removido de la lista de terminales conectadas. Este tipo de sistemas incorpora a sus diseños emisores de señales y sensores, los mismos que deben ser colocados en lugares aptos y calibrados.



**Figura 2. 2 Nodos en una red [1]**

---

<sup>1</sup> Tomada del libro Local Positioning Systems: LBS Applications and Services, Kolodziej Krzysztof, Hjeltn Johansson

La planificación es una etapa muy considerada al momento de elaborar un proyecto de posicionamiento local, por tanto es necesario tomar un tiempo para poder elegir la mejor opción de acuerdo a las características deseadas, de esta manera se obtienen grandes beneficios como la prevención y detección de errores comunes y reacción ante errores no previstos minimizando sus consecuencias. Existen varios métodos para determinar la localización actual de un objeto en movimiento y éstos varían según su aplicación. En el caso de este proyecto se ha considerado dos aspectos: Métodos matemáticos de estimación y Tecnología física que lo sustenta.

### **MÉTODO MATEMÁTICO DE ESTIMACIÓN**

Según el tipo de aplicación, existen varios métodos para determinar matemáticamente la posición de un objeto. Esta ubicación va a depender de las señales que los dispositivos del sistema transmitan o reciban. Teniendo en cuenta estos aspectos se ha considerado los siguientes métodos de estimación matemática:

- Localización de tipo geográfica
- Localización basada en huellas
- Localización probabilística

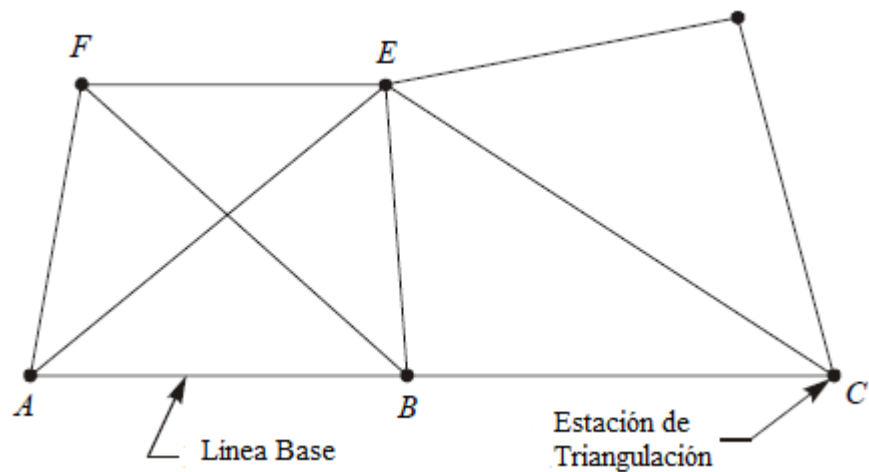
## **LOCALIZACIÓN DE TIPO GEOGRÁFICA**

Emplean métodos de solución algebraicos que involucren análisis geométricos como sistemas de ecuaciones lineales. En este grupo se ubican los métodos de Triangulación y Trilateración

### **TRIANGULACIÓN**

Es un método de medición basado en la propuesta trigonométrica que si se conoce un lado y dos ángulos de un triángulo, los lados restantes pueden ser fácilmente calculados. Además, si la dirección de un lado es conocida, entonces las direcciones restantes también pueden ser determinadas. Un sistema de triangulación consta de una serie de triángulos unidos o sobrepuestos en los cuales uno de sus lados es de medida conocida y los lados restantes son calculados por medio de ángulos medidos en los vértices de los triángulos.

Los vértices son conocidos como estaciones de triangulación y el lado del triángulo cuyo lado es conocido toma el nombre de línea base. A continuación la figura 2.3 muestra una red de un sistema de triangulación que junta todas las estaciones de triangulación.



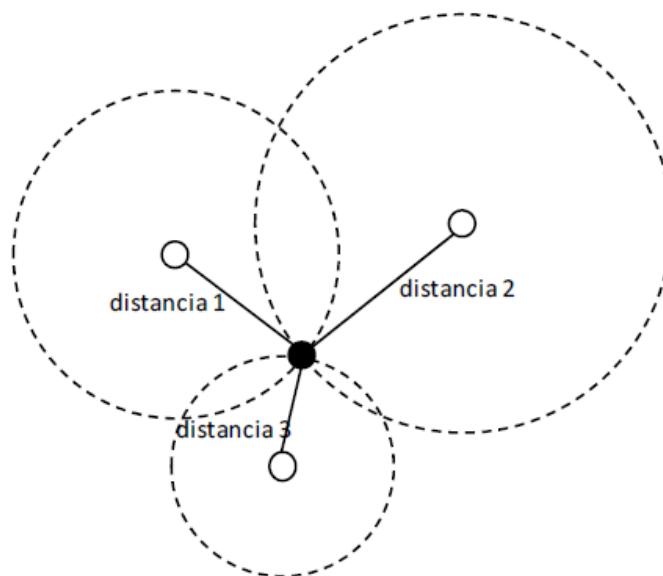
**Figura 2. 3 Ejemplo de triangulación**

### TRILATERACIÓN

Consiste en calcular la posición de un nodo midiendo las distancias desde él mismo hasta varias posiciones de referencia (o balizas). Para calcular la posición de un nodo en dos dimensiones es necesario conocer al menos las distancias desde tres balizas no colineales (en diferentes líneas), como se muestra en la figura 2.4. En tres dimensiones, son necesarias cuatro balizas en planos distintos.

Para medir la distancia entre un nodo desconocido y una baliza, se utilizará una de las técnicas de estimación de distancias llamada Tiempo de Llegada (ToA).

Ésta consiste de medir el tiempo que tarda una señal en viajar de un nodo a otro a una velocidad conocida.



**Figura 2. 4 Ejemplo de trilateración**

## **LOCALIZACIÓN BASADA EN HUELLAS**

También conocida como *fingerprint* y se basa en comparar la potencia y el retardo de una señal con una base de datos que guarda dichas potencias y retardos para distintas localizaciones. Para hallar la posición de un objeto utiliza un método de aprendizaje y experiencia conocido como k-vecinos más próximos. Es una técnica de aprendizaje que consiste en almacenar una serie de ejemplos o “huellas” en la fase de entrenamiento, cuando se intenta localizar



una nueva posición se consulta los datos de entrenamiento ubicando al cliente por proximidad. Se requiere un sistema suficientemente entrenado para poder localizar con precisión.

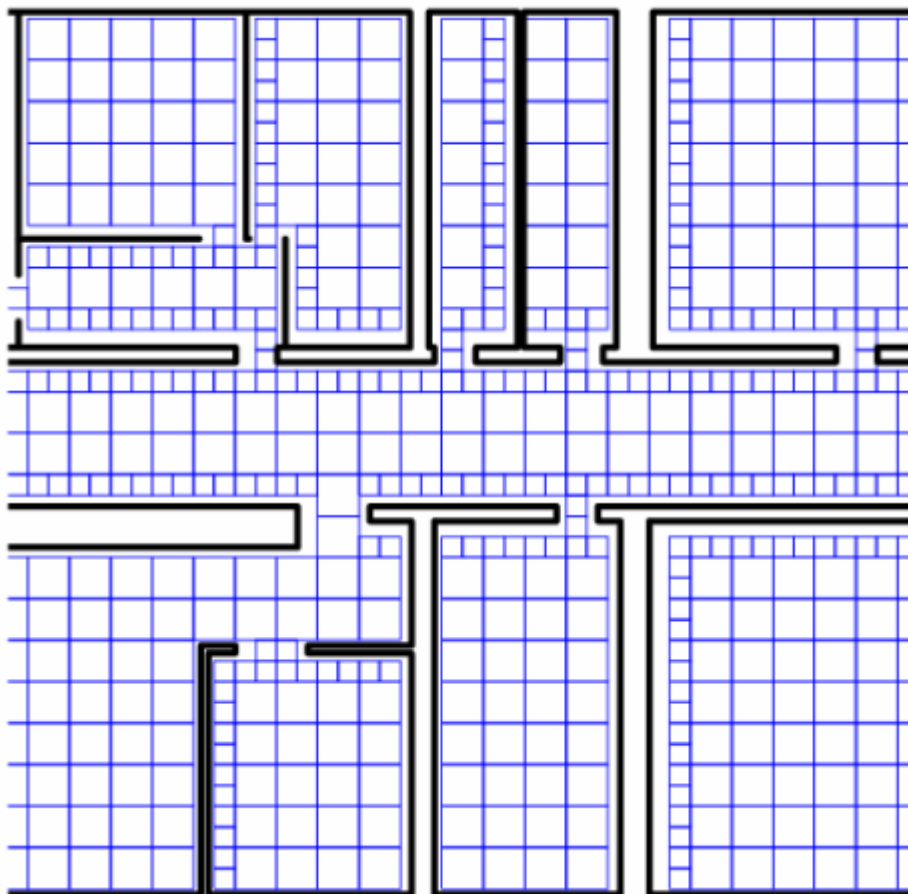
## **LOCALIZACIÓN PROBABILÍSTICA**

Emplea teorías de probabilidad como “Teorema de Bayes”, que relaciona dos variables no independientes, en este caso  $x$  se refiere a la posición y  $z$  representa a la medida del sensor.

$$p(x|z) = \frac{p(z|x)p(x)}{p(z)}$$

Es una técnica probabilística que mantiene una distribución de probabilidad sobre todas las posibles ubicaciones del entorno. Las técnicas probabilísticas consiguen una precisión superior que las técnicas deterministas a cambio de un mayor coste computacional. La aproximación Bayesiana se suele aplicar en los casos en los que la representación del entorno es en forma de rejillas como se puede observar en la Figura 2.5. Otra alternativa para modelar el entorno es mediante un mapa topológico. En este caso la localización se basa en el hecho

de que el dispositivo identifica automáticamente que ha alcanzado un nodo del mapa en base a alguna información geométrica del entorno.



**Figura 2.5** Rejilla estática que recubre todo el entorno de trabajo

### **TECNOLOGÍA FÍSICA QUE LOS SUSTENTA.**

En la mayoría de sistemas LPS predomina la creación de redes inalámbricas personales o WPAN. Éstas engloban a redes cuyo rango de acción se limita a

unos pocos metros y en las que el soporte físico de la información lo constituyen las ondas de radio. Por su radio de acción estas tecnologías se suelen utilizar en entornos reducidos y acotados

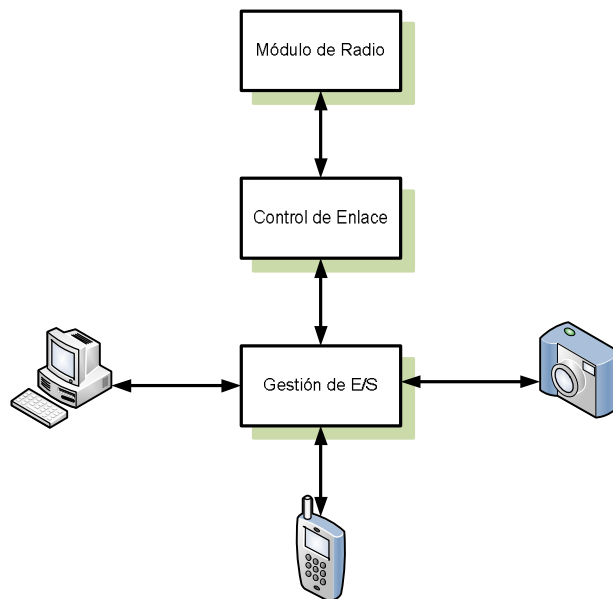
Cada vez más, la tecnología es parte de la vida diaria, una muestra de ello es la revolución causada por Internet y Telefonía Móvil. La capacidad de los usuarios para desarrollar nuevas aplicaciones motivan a las redes WPAN a desarrollar nuevas opciones e ingresarlas en un mercado que, hasta hace poco, tenían escasa penetración tecnológica. Estos nuevos frentes han sido notables, sobre todo en entornos de corta distancia y bajas velocidades de transmisión.

Cada una de estas aplicaciones presenta necesidades diferentes con el fin de soportar este tipo de comunicaciones se han desarrollado las siguientes tecnologías de comunicación inalámbrica:

- Bluetooth
- WiFi
- HomeRF
- Zigbee
- UWM
- RFID

## BLUETOOTH

Es un estándar de conectividad inalámbrica basado en terminales de bajo coste y pequeño alcance (aproximadamente 10 m). A pesar que nació con la idea de sustituir a los cables en la conexión de periféricos, se ha convertido en un mecanismo de interconexión de redes. Un dispositivo genérico se compone de un módulo de radio, un modulo de control del enlace y un módulo para la gestión del enlace y de la entrada salida, como se muestra en la figura 2.6



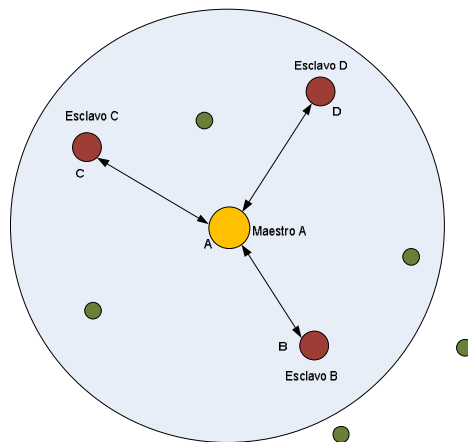
**Figura 2.6 Esquema de un dispositivo Bluetooth genérico**

Donde el módulo de radio especifica los parámetros relacionados con la interfaz del medio físico como banda de frecuencias, tipo de modulación, el control de

enlace es una máquina de estado en la que se distinguen dos estados principales (STANDBY y CONNECTION) y siete sub-estados.

Bluetooth soporta comunicación punto a punto y punto a multipunto y su rango de frecuencias es la de 2,4 GHz banda ISM con modulación GFSK. Se puede transmitir voz, datos e incluso video a velocidades de hasta 721kbps, en efecto, Bluetooth no sólo soporta las comunicaciones de datos sino también ofrece 3 canales de voz de 64kbps, ampliando así el número de aplicaciones.

Los dispositivos bluetooth se agrupan en lo que se conoce como *piconet* o picoceldas de radio de cobertura reducido, siendo ocho (un maestro y siete esclavos) el número máximo de unidades que pueden participar activamente en una simple picocelda. Un ejemplo de picocelda Bluetooth se muestra en la siguiente figura:



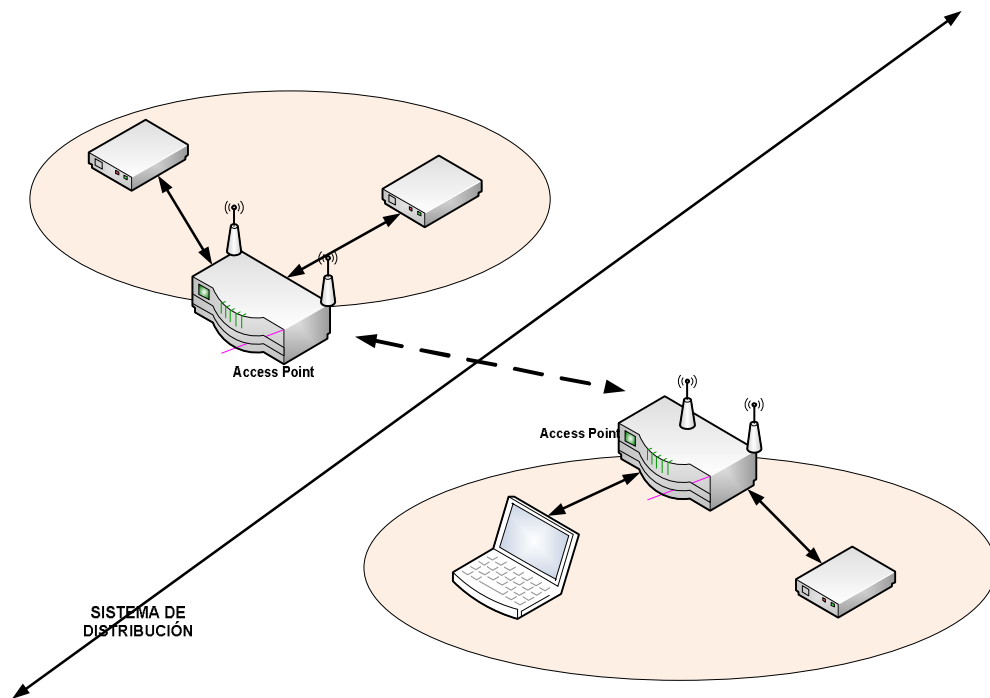
**Figura 2. 7 Picocelda Bluetooth**

Las aplicaciones de Bluetooth van mucho más allá de la conexión de dispositivos sin necesidad de utilizar cables. Una de las más inmediatas es la transferencia de archivos entre dos dispositivos. Otra posibilidad es utilizar un punto de acceso Bluetooth para conectarse a una red LAN o para sincronizar dispositivos entre sí.

## **WiFi**

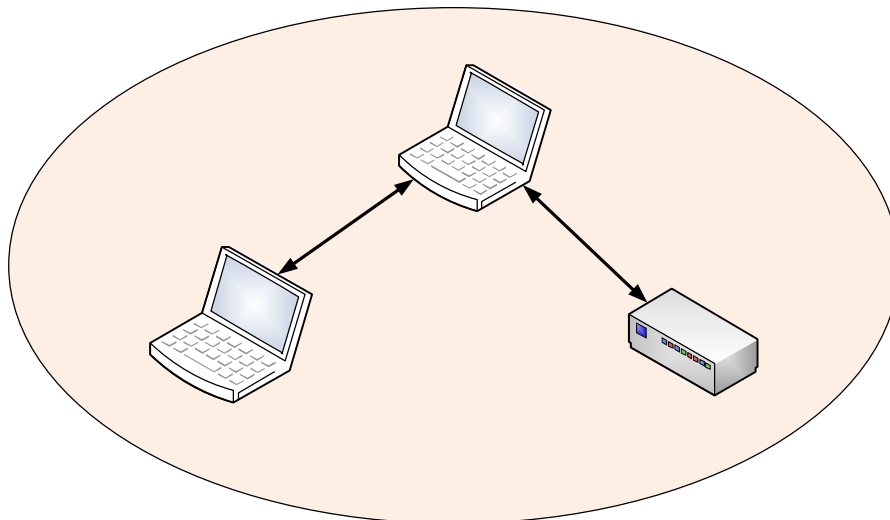
Wi-Fi (Wireless Fidelity) es el nombre coloquial de la familia de estándares IEEE 802.11 para redes locales inalámbricas (WLAN) que soportan el estándar IEEE 802.11x. Se ha diseñado para eliminar la necesidad de conectarse a una red LAN empleando un cable de red como se realiza tradicionalmente.

Una red 802.11 genérica está dividida en celdas llamadas BSS (Basic Service Set), que son zonas de cobertura gobernadas por una estación base o punto de acceso (Access Point, AP). Para que estos dispositivos puedan comunicarse entre sí, es necesario que los AP se conecten a través del sistema troncal de distribución (DS, Distribution System). La siguiente figura muestra la arquitectura de una red 802.11 genérica



**Figura 2.8 Componentes de una red IEEE 802.11**

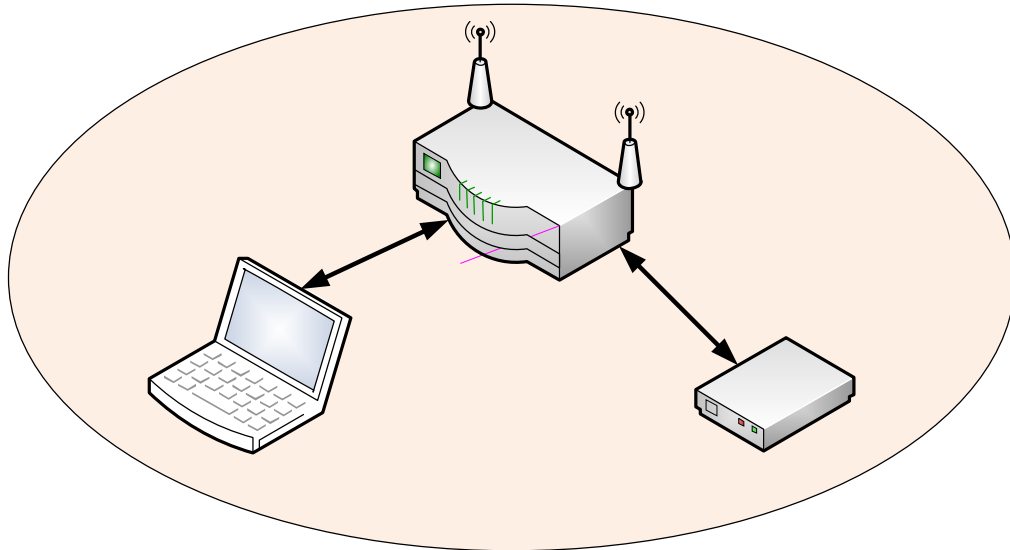
En una red Wi-Fi se pueden distinguir dos tipos de configuraciones diferentes, en función del uso o no de puntos de acceso. La configuración más sencilla son las redes ad-hoc también conocidas como (P2P, Peer-to-Peer), en las que los terminales móviles se comunican directamente empleando para ello una tarjeta adaptadora para comunicaciones inalámbricas (ver Figura 2.9). La única limitación es que los dispositivos se encuentren dentro de sus respectivas áreas de cobertura.



**Figura 2.9 Configuración ad-hoc**

La siguiente es aquella en la que los equipos móviles se comunican entre sí a través de un AP. El usuario, una vez conectado al punto de acceso, podrá ir moviéndose libremente por las zonas en las que haya cobertura y, en su movimiento irá cambiando de punto de acceso según las necesidades. Este es un tipo de redes mucho más compleja porque requiere de una planificación muy cuidadosa ya que los puntos de acceso deben distribuirse estratégicamente para evitar que algunas zonas se queden sin cobertura, evitar obstáculos, asegurar un ancho de banda mínimo para cada usuario, etc. Una muestra de estas dos topologías anteriormente detalladas se puede observar en la siguiente figura:





**Figura 2. 10 Configuración Punto de Acceso**

Además de las redes corporativas inalámbricas, la tecnología Wi-Fi resulta muy adecuada en hotspots, lugares públicos de acceso a Internet. Por otra parte, otra de las nuevas tendencias tecnológicas es la integración de voz y datos en una única infraestructura.

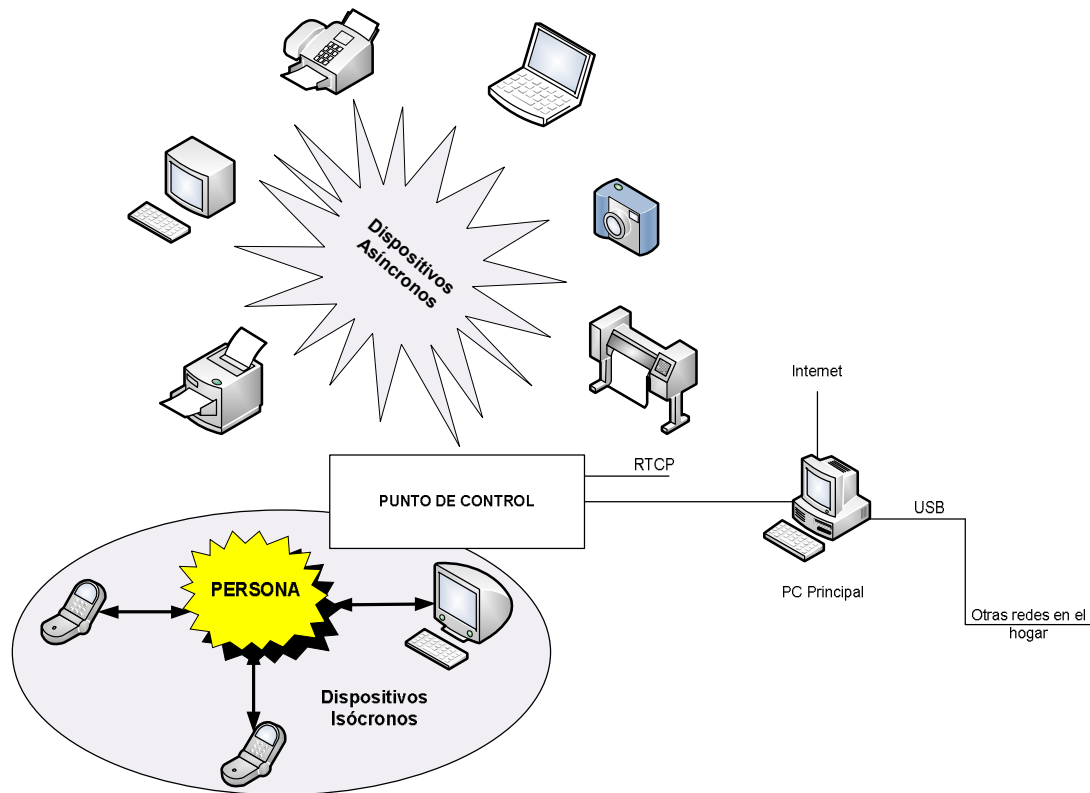
### **HomeRF**

Es una tecnología de transmisión digital inalámbrica abierta desarrollada por el **HomeRF Working Group**. Fue creado para proporcionar interconexión entre productos electrónicos de consumo dentro del hogar y opera en la banda de

2.4GHz. Se encuadra en una arquitectura que soporta comunicaciones de datos y voz en tiempo real, mediante el empleo del protocolo SWAP (Shared Wireless Access Point). La principal ventaja del protocolo HomeRF es que, a diferencia de otras tecnologías inalámbricas, permite distribuir video y audio en dispositivos con escasos recursos hardware, como los equipos Hi-Fi o las PDA

Una red HomeRF puede configurarse en modo ad-hoc o en modo con punto de control. En el primer caso, solamente se soporta la comunicación de datos entre dispositivos que se conectan punto a punto. En esta configuración, todos los nodos de la red se comportan por igual y el control de ésta está distribuido entre todos ellos.

También se puede usar la configuración con punto de control, donde el PC del usuario desempeña un papel fundamental ya que éste estará conectado, por una parte a Internet y por otra al punto de control. El resto de dispositivos de la red pueden ser llamados Isócronos, que son los que requieren un punto de control y un ancho de banda garantizado para poder establecer una comunicación, y Asíncronos, que son los que no necesitan del punto de control para la conexión con otros dispositivos. Una red típica HomeRF se muestra en la figura 2.11



**Figura 2. 11 Red HomeRF**

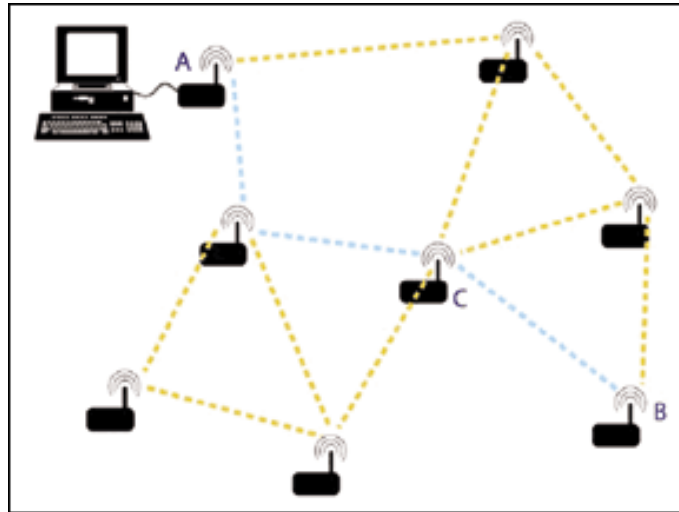
Los ámbitos de aplicación de HomeRF son exclusivamente a entornos muy reducidos como es el caso de un hogar. Por tanto la aplicación más sobresaliente es la domótica. En efecto, junto con un sistema de reconocimiento de voz, el teléfono podría utilizarse, por ejemplo, para cambiar el termostato de la calefacción o encender el horno. Otra posibilidad es emplear HomeRF para conectar el PC a una terminal móvil y poder acceder a Internet desde dicho terminal a través del enlace entre ambos.

## **ZigBee**

Es el nombre de la especificación de un conjunto de protocolos de alto nivel de comunicación inalámbrica para su utilización con radio digital de bajo consumo, basada en el estándar IEEE 802.15.4 de redes WPAN (wireless personal area network). Su objetivo son las aplicaciones que requieren comunicaciones seguras con baja tasa de envío de datos y maximización de la vida útil de sus baterías.

A diferencia de otras tecnologías, ZigBee está especialmente diseñada para grandes redes de sensores, con las características inherentes a ellas: fiabilidad, larga duración de las baterías de los dispositivos, bajos costes, tamaño diminuto y complejidad reducida, sin requerimientos de calidad de servicio importantes. El objetivo es ofrecer un estándar abierto, eficiente, de poco consumo e inalámbrico para la monitorización y control de dispositivos.

El estándar 802.15.4 permite configuraciones "punto a punto" o "punto a multipunto". También incorpora "Mesh Networking", que consiste en utilizar los mismos dispositivos de la red para traspasar información entre puntos que no tienen comunicación entre ellos, como lo ilustra la figura 2.12



**Figura 2.12 Mesh Networking**

Según la figura, la distancia entre los puntos A y B es muy grande, quedando los equipos fuera del alcance, por lo tanto, para establecer la comunicación entre A y B, se pasa por el dispositivo C y otros. Esto se hace en forma automática sin requerir la intervención del usuario, permitiendo, por ejemplo, que el dispositivo C sea removido, y el sistema buscará automáticamente otro camino.

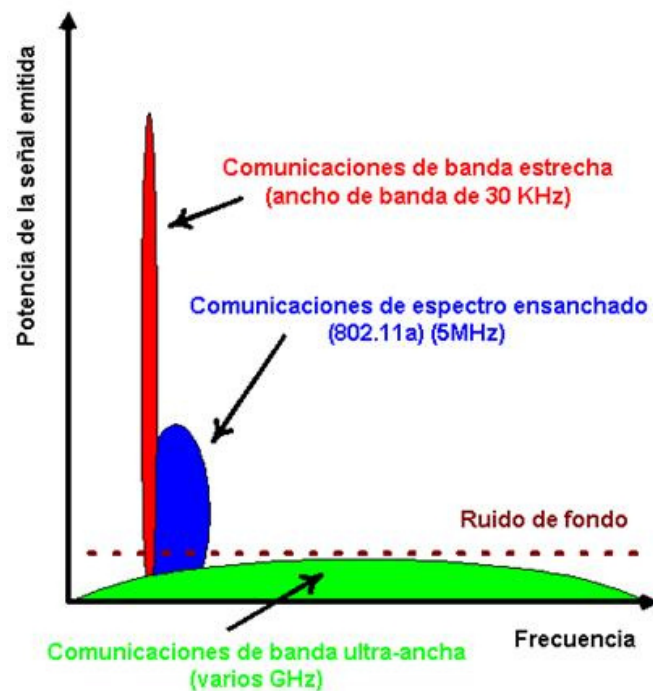
Como ZigBee fue diseñado para aplicaciones de bajo consumo, es ideal para el desarrollo de sistemas embebidos, donde la versatilidad y fiabilidad son importantes, pero no requieren mucho ancho de banda.

## **UWB**

Es una tecnología basada en la transmisión de pulsos de energía modulados del orden de los picosegundos de duración. La característica principal es la expansión del ancho de banda de la señal y la disminución de la densidad espectral de potencia, permitiendo la coexistencia con otro tipo de tecnologías radio (ver figura 2.13).

Las ventajas de UWB en comparación con otras tecnologías son su mayor robustez frente a la propagación multicamino, menor potencia de transmisión, localización de dispositivos, bajo coste y alta productividad. Un aspecto negativo de UWB es el alcance, ya que si se aumenta disminuye la velocidad de transmisión, debido a las limitaciones de potencia.

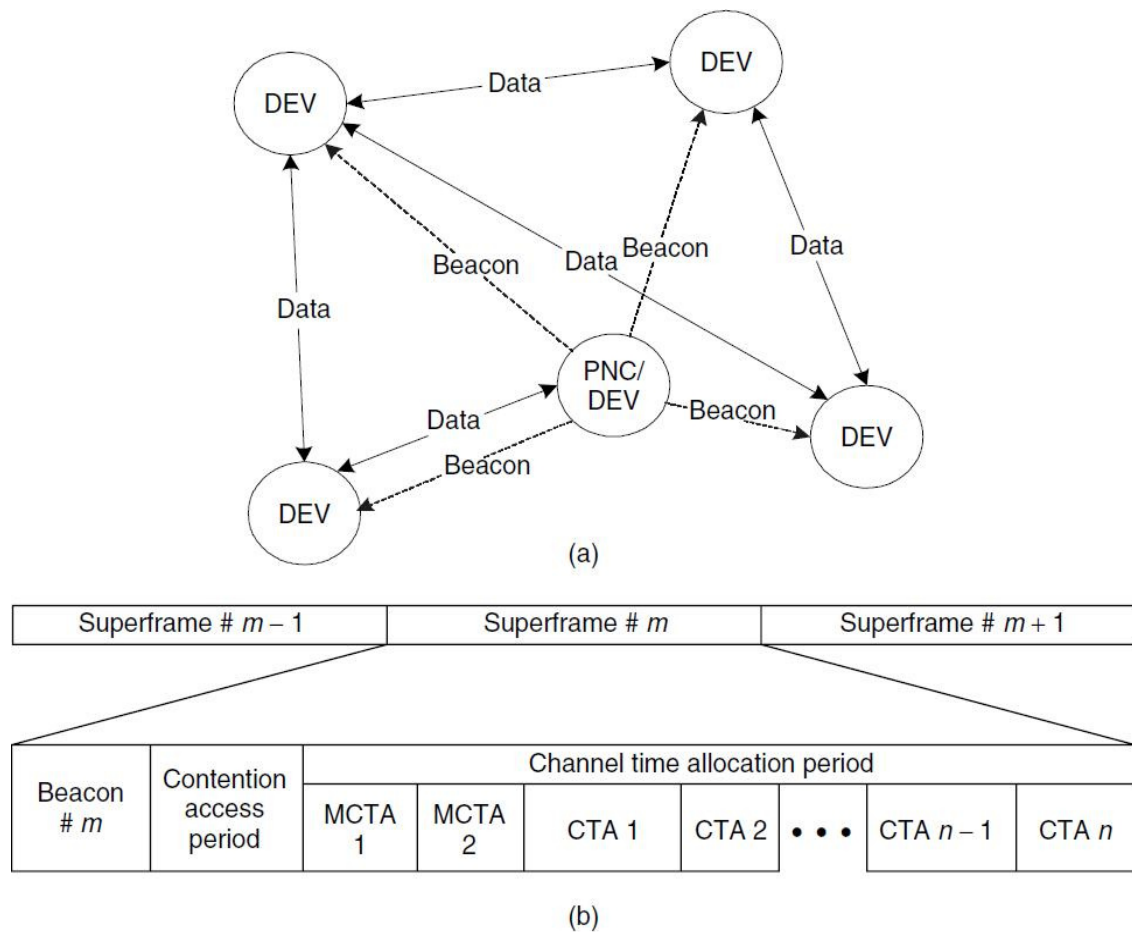
Este alcance también se verá afectado en el caso de presencia de obstáculos que tiendan a reflejar las señales, pero su capacidad de atravesar estructuras u objetos es mucho mayor que la de otras tecnologías inalámbricas.



**Figura 2. 13 Espectro de frecuencias UWB**

La red personal UWB, definida por la IEEE como 802.15.3, es un sistema inalámbrico de comunicación de datos con configuración ad-hoc que permite que un número de dispositivos independientes se comuniquen entre ellos. Esta red toma el nombre de *piconet*, como se muestra en la figura 2.14 (a) y cada dispositivo independiente fue diseñado para bajos consumos de potencia y es de coste bajo. Uno de los dispositivos de la piconet estará obligado a asumir el papel de controlador o PNC (Piconet Controller), que se encarga de mantener la sincronización, del control de admisión y de asignar los recursos de la piconet de acuerdo con las políticas establecidas de Calidad de Servicio (QoS).

La Calidad de servicio se consigue a través de un protocolo MAC, que está dividido en supertramas TDMA que poseen tres grandes componentes como: baliza, Periodo de Contención y Periodo libre de Contención, como se observa en la figura 2.14(b).



**Figura 2. 14 (a) Estructura de una piconet UWB; (b) Supertrama UWB [2]**

<sup>2</sup> Tomada del libro Ultra-wideband wireless communications and networks, Shen X, Guizani M.



Actualmente ésta es un área que ha generado mucho interés. Un ancho de banda enorme y sin licencia ha sido el motivo principal de investigación en este campo. Por lo tanto, la convierte en una herramienta ideal para las comunicaciones de corto alcance y alta transferencia de datos, las cuales son muy convenientes para aplicaciones multimedia en redes inalámbricas internas. Otra aplicación de UWB se da en las redes de sensores y estimación de posicionamiento. El ancho de los pulsos y la baja densidad de potencia hacen que la señal UWB aparezca como ruido en otros sistemas de comunicación, por lo tanto el impulso de la radio se impone. Este uso es muy común en las comunicaciones de alta seguridad. Además se puede emplear la codificación y la extensión para incrementar la ganancia del proceso del impulso de radio, haciéndolo inmune a interferencias de otros sistemas. Es por este motivo que esta tecnología fue inicialmente concebida para estudios y aplicaciones militares

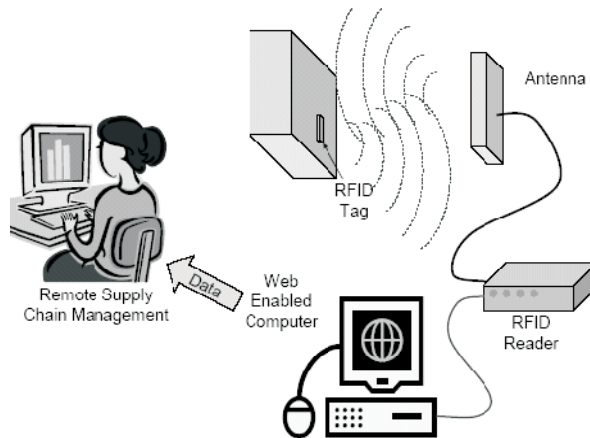
## **RFID**

RFID (Radio Frequency Identification) es una tecnología emergente con mayor crecimiento en los últimos años gracias a las industrias dedicadas a la recolección automática de datos. Sin embargo esta tecnología no es nueva; constituye una manera sencilla y barata de sustituir al código de barras y de

soportar aplicaciones como identificación de mercancías y vehículos. RFID opera en el espacio de espectro libre, cuyas frecuencias de portadora están en el rango de 125 KHz a 2.45 GHz y según su aplicación, las bandas de frecuencia deben seleccionarse cuidadosamente debido a que cada una tiene sus ventajas y desventajas.

En términos generales, RFID es una opción más para identificar objetos y personas utilizando ondas de radio. La identificación se basa en el empleo de etiquetas de RF, en las que se puede almacenar información que podrá ser leída si se les interroga de la manera adecuada. Esta tecnología ha permitido el desarrollo de etiquetas inteligentes de bajo coste y fácilmente integrables con otro tipo de sistemas.

Un sistema RFID está conformado por tres partes: etiquetas, lectores y puestos de control (ver Figura 2.15). Un requerimiento esencial en un sistema RFID es transferir los datos guardados en una etiqueta por medio de una interfaz inalámbrica.



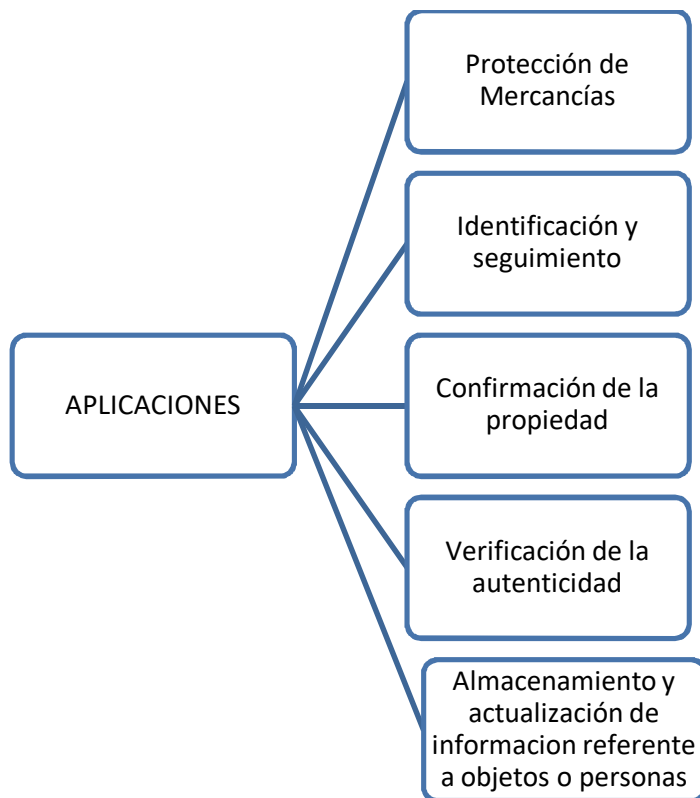
**Figura 2. 15 Arquitectura RFID [3]**

Se requiere un proceso de comunicación de dos vías y una señal portadora de radio modulada para que lleve la información. El funcionamiento del sistema depende de si las etiquetas son activas o pasivas. En el primer caso, las propias etiquetas tienen la capacidad de enviar por sí solas los datos que almacenan. Por el contrario, si las etiquetas son pasivas, deben ser interrogadas explícitamente por el lector. Una vez que las etiquetas proporcionan su información, ésta es captada por el lector y enviada al puesto de control.

La tecnología de RFID es extremadamente versátil y se puede aplicar a una gama diversa de sectores comerciales e industriales, a continuación se muestra en la figura 2.16 diversos campos de aplicación de esta tecnología:

---

<sup>3</sup> Tomada del libro RFID Design Principles, Lehpamer Harvey



**Figura 2. 16 Aplicaciones RFID**

RFID combinado con la tecnología de códigos electrónicos de productos puede convertirse en una gran ayuda para disminuir costos y mejorar la gestión logística de los almacenes, centros comerciales y el sector minorista, en general.

### 2.2.1. PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICA PARA TELEMETRÍA

En el campo de las telecomunicaciones, un **protocolo de comunicaciones** es el conjunto de reglas normalizadas para la representación, señalización, autenticación y detección de errores necesario para enviar información a través de un canal de comunicación.

Los protocolos implantados en sistemas de comunicación de amplio impacto, suelen convertirse en estándares, debido a que la comunicación e intercambio de datos es un factor fundamental en numerosos sistemas, y para asegurar tal comunicación se vuelve necesario copiar el diseño y funcionamiento a partir del ejemplo pre-existente.

En telemetría, los estándares de comunicación más populares son los establecidos por el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos IEEE, entre los cuales están:

- IEEE 802.11
- IEEE 802.15
- IEEE 802.16

## **ESTANDAR IEEE 802.11**

En el año 1997, IEE añadió un nuevo miembro a la familia 802 que se ocuparía de definir las redes inalámbricas de área local. Este es el estándar IEE 802.11

La primera norma utilizaba infrarrojos como medio de transmisión. Esta norma nunca tuvo una buena aceptación en el mercado. Posteriormente salieron otras dos normas 802.11 basadas en el uso de radiofrecuencia en la banda de 2.4GHz. Ambas se diferencian en el método de transmisión de radio utilizado. Una utiliza el sistema FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) y la otra emplea el sistema DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)

## **ESTANDAR IEEE 802.15**

IEEE 802.15 es un grupo de trabajo dentro de IEEE 802 especializado en redes inalámbricas de área personal (WPAN). Los estándares que desarrolla definen redes tipo PAN, centradas en las cortas distancias. El grupo de estándares 802.15 permite que dispositivos portátiles como PC, PDAs, teléfonos y sensores utilizados en domótica, puedan comunicarse e interoperar. Se dividen en sub-estándares del 1 al 5

IEEE 802.15.1 es un estándar que presenta una WPAN que utiliza tecnología inalámbrica Bluetooth. Incluye nivel físico y control de acceso al medio.

IEEE 802.15.2 estudia los posibles problemas derivados de la coexistencia de redes inalámbricas de áreas personales con otros dispositivos inalámbricos que utilicen las bandas de frecuencia no reguladas, tales como redes inalámbricas de área local.

IEEE 802.15.3 es un estándar que define los niveles físico y control de acceso al medio para redes inalámbricas personales de alta velocidad (11-55 Mbps).

IEEE 802.15.4 es un estándar que define el nivel físico y el control de acceso al medio de redes inalámbricas de área personal con tasas bajas de transmisión de datos. También es la base sobre la que se define la especificación de ZigBee, cuyo propósito es ofrecer una solución completa para este tipo de redes construyendo los niveles superiores de la pila de protocolos que el estándar no cubre.

IEEE 802.15.5 es un estándar para las redes en malla en el ámbito de las redes inalámbricas de área personal.

## **ESTANDAR IEEE 802.16**

Se trata de una especificación para las redes de acceso metropolitanas inalámbricas de banda ancha fijas (no móvil) publicada inicialmente el 8 de abril de 2002. La tecnología característica de este estándar es WiMAX (WorldWide Interoperability for Microwave Access). Este estándar ocupa el espectro de frecuencias ampliamente, usando las frecuencias desde 2 hasta 11 Ghz para la comunicación de la última milla (de la estación base a los usuarios finales) y ocupando frecuencias entre 11 y 60 Ghz para las comunicaciones con línea vista entre las estaciones bases.

### **2.2.2. TABLA COMPARATIVA DE LOS MÉTODOS DE LPS**

A continuación se mostrará una tabla comparativa de los métodos más conocidos para el desarrollo de proyectos de sistemas de posicionamiento local.



<b>TABLA COMPARATIVA</b>			
	<b>WIFI</b>	<b>Bluetooth</b>	<b>ZigBee</b>
<b>Bandas de Frecuencia</b>	2.4GHz	2.4GHz	2.4 GHz 868 / 915 MHz
<b>Tasa de Transferencia nominal</b>	11Mbps	11Mbps	250Kbps (2.4 GHz) 40Kbps (915 MHz) 20Kbps (868 MHz)
<b>Número de Canales</b>	11 – 14	79	16 (2.4 GHz) 10 (915 MHz) 1 (868 MHz)
<b>Tipos de Datos</b>	Digital	Digital, Audio	Digital (Texto)
<b>Rango de Nodos Internos</b>	100 m	10 – 100 m	10 – 100 m
<b>Número máximo de dispositivos</b>	32	8	255 / 65535
<b>Consumo de la Batería</b>	Alto	Medio	Poco
<b>Topología Soportada</b>	Estrella	Estrella	Estrella y Punto a punto

<b>Consumo de Corriente</b>	400 mA transmitiendo 20 mA en reposo	40 mA transmitiendo 0.2mA en reposo	30 mA transmitiendo 3 mA en reposo
<b>Costo (10 = más costoso)</b>	9	5	2

**Tabla 2. 1 Comparación de las diferentes tecnologías**

### **2.3. INTRODUCCIÓN A TECNOLOGIA ZIGBEE**

En algunas aplicaciones en las que participan pequeños dispositivos como sencillos sensores no suele ser necesarias altas tasas binarias. Estos sistemas se caracterizan por comunicaciones esporádicas en las que el mayor volumen de información apenas supera unas pocas decenas de kilobits por segundo y por requerir un alcance limitado a pocas decenas de metros, facilita la portabilidad de la red y la instalación de este tipo de dispositivos. En estos entornos resulta más crítico minimizar costes, tamaño y consumo de potencia de los dispositivos.

Zigbee es una tecnología basada en el estándar IEEE 802.15.4 de redes inalámbricas de área personal (wireless personal área Newark, WPAN) y se

orienta a aplicaciones que requieren comunicaciones seguras con baja tasa de envío de datos y maximización de la vida útil de sus baterías. Fue desarrollado por *Zigbee Alliance*, siendo fundada en el 2002 como una compañía sin fines de lucro y abierta para las personas que quieran integrarla. Es ideal para conexiones con diversos tipos de topología, ofreciendo seguridad, economía y poca dificultad a la hora de su construcción porque es relativamente sencilla.

## **VENTAJAS**

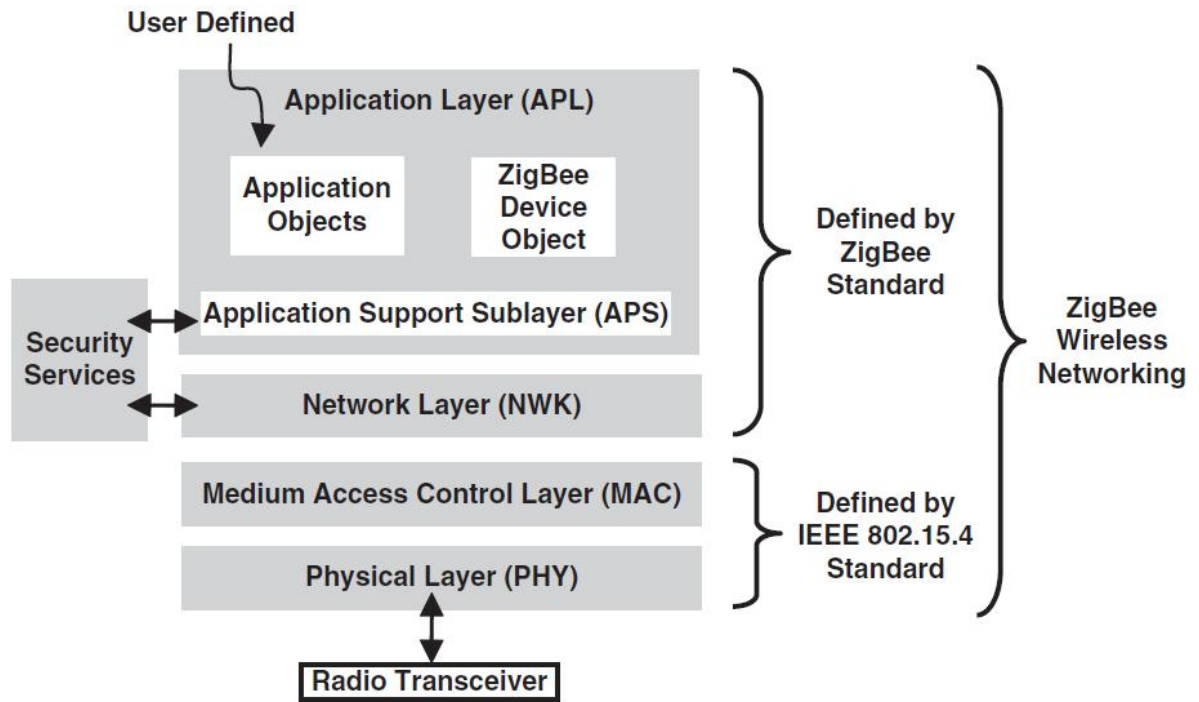
- a) Ideal para conexiones punto a punto y punto a multipunto
- b) Son más económicos y de fácil construcción.
- c) Óptimo para redes de baja tasa de transferencia de datos.
- d) Reduce tiempos de espera en el envío y recepción de paquetes.
- e) Baja ciclo de trabajo - Proporciona larga duración de la batería.
- f) Soporte para múltiples topologías de red: Estática, dinámica, estrella y malla.
- g) Hasta 65.000 nodos en una red.
- h) 128-bit AES de cifrado - Provee conexiones seguras entre dispositivos.

## **DESVENTAJAS**

- a) Baja tasa de transferencia
- b) Manipula textos pequeños comparados con otras tecnologías.
- c) No es compatible con Bluetooth debido a que no tienen las mismas tasas de transferencia, ni la misma capacidad de soporte para nodos.
- d) Tiene menor cobertura porque pertenece a las redes inalámbricas WPAN.

## **ARQUITECTURA**

Una de las vías comunes para establecer la comunicación en una red, tanto Ethernet como Wireless es empleando el concepto de Capas de Red. Cada capa es responsable de ciertas funciones en la red, pasando su información, ya sea datos o comandos, a las capas con las que esté directamente conectada. Las capas de red del protocolo inalámbrico ZigBee se basan en el modelo básico de referencia OSI (Open System Interconnect).



**Figura 2. 17 Capas de Red del protocolo Inalámbrico ZigBee<sup>[4]</sup>**

Como se puede observar en la figura 2.17, el protocolo inalámbrico ZigBee está dividido en cinco capas de red. El hecho de dividir a un protocolo en varias capas tiene muchas ventajas, por ejemplo, si el protocolo cambia con el pasar del tiempo, es sencillo modificar o cambiar la capa que fue afectada por el cambio en lugar de reemplazar todo el protocolo. Además en el desarrollo de aplicaciones, las capas inferiores de un protocolo son independientes de la aplicación y pueden ser obtenidas por terceros, entonces, en este caso lo único que se tendría que cambiar sería la capa de aplicación de ese protocolo.

<sup>4</sup> Tomada del libro ZigBee Wireless Networks and Transceivers, Farahani Shahin, Newnes

Las capas inferiores de la red Inalámbrica ZigBee están definidas por el estándar IEEE 802.15.4 mientras que el estándar propio de ZigBee define a las tres restantes.

La capa de más bajo nivel es la capa física (*PHY*), que en conjunto con la capa de acceso al medio (*MAC*), brindan los servicios de transmisión de datos por el aire, punto a punto. Estas dos capas están descritas en el estándar IEEE 802.15.4–2003. El estándar trabaja sobre las bandas ISM de uso no regulado, donde se definen hasta 16 canales en el rango de 2.4 GHz, cada una de ellas con un ancho de banda de 5 MHz. Se utilizan radios con un *espectro de dispersión de secuencia directa*, lográndose tasas de transmisión en el aire de hasta 250 Kbps en rangos que oscilan entre los 10 y 75 m, los cuales dependen bastante del entorno

La *capa de red (NWK)* se ubica entre la capa de acceso al medio (*MAC*) y la de aplicación (*APL*) y es responsable de manejar la formación y enrutamiento de la red. En esta capa se implementan las distintas topologías de red que ZigBee soporta (árbol, estrella y mesh network). También encamina tramas a sus respectivos destinos a través del controlador de red cuando esta se encuentra uniendo o separando dispositivos, siendo el controlador de red responsable de crear una nueva red y asignar direcciones a los dispositivos de la misma.

En una red wireless, los mensajes transmitidos pueden ser recibidos por cualquier dispositivo cercano, incluyendo intrusos. El bloque de seguridad se encarga de proteger la integridad de los paquetes empleando métodos como algoritmos de encriptación que modifica un mensaje utilizando una cadena de bits conocidos como claves de seguridad permitiendo que sólo el destinatario correcto pueda leer el mensaje original.

La capa de aplicación es el nivel más alto en la red Inalámbrica Zigbee, donde los fabricantes son los encargados de construir un dispositivo según el tipo de aplicación. En esta capa se encuentran los ZDO (ZigBee Device Objects) que se encargan de definir el papel del dispositivo en la red, si el actuará como coordinador, ruteador o dispositivo final.

## **FRECUENCIAS DE OPERACIÓN**

Hay tres bandas de frecuencia, con 27 canales disponibles, en la última versión de IEEE 802.15.4

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

La banda de 868 MHz es usado en Europa en diversas aplicaciones incluyendo las de bajo coste. Disponen de un solo canal, tiene una tasa de transferencia de 20Kbps y presenta modulación BPSQ. Esta modulación consiste en mostrar como resultado dos posibles fases para la portadora con una sola frecuencia. Una fase mostrará un 1 lógico y la segunda un 0 lógico y conforme la señal digital de entrada va cambiando de estado, la portadora de la salida tendrá una diferencia de fase de  $180^\circ$ .

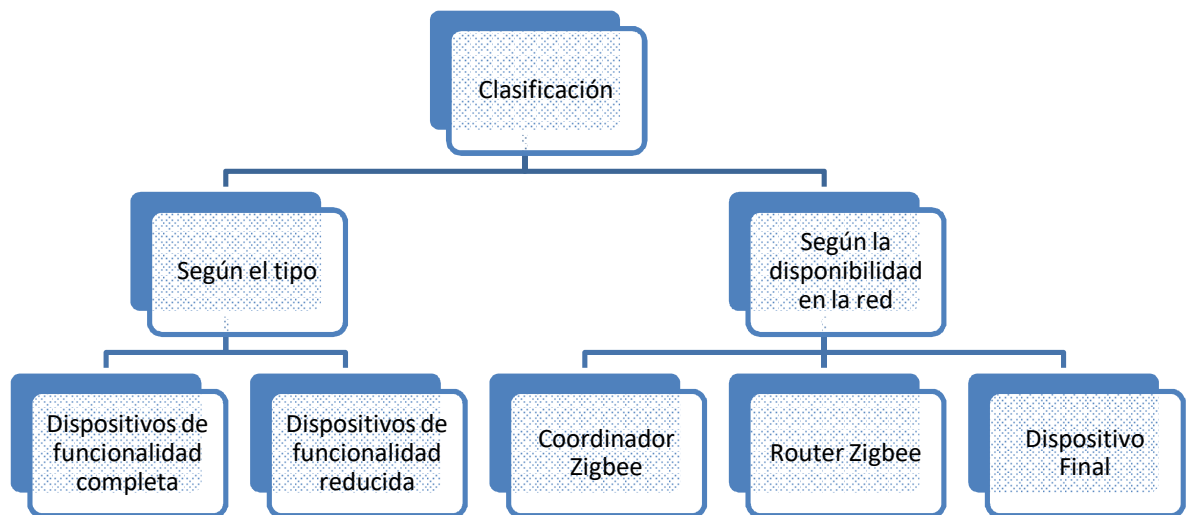
La banda de 915MHz es utilizada en Norteamérica. Tiene una banda de transferencia de 40 Kbps y dispone de 10 canales y opera en la banda libre ISM (Industrial, Scientific & Medical). Al igual que la banda anterior, ésta emplea modulación BPSK (Binary Phase Shift Keying).

La banda de 2.4GHz es de uso mundial, es también considerada como banda de uso libre. Disponen de 16 canales y su tasa de transferencia es de 250Kbps. Por las razones expuestas anteriormente, desarrollar transceivers que operen en esta banda es la opción más popular de los fabricantes. Se utiliza la modulación O-QPSK (Offset Quadrature Phase Shift Keying) que consiste en realizar una transición de fase en cada intervalo de señalización de bits, por portadora en cuadratura.



## CLASIFICACIÓN DE DISPOSITIVOS

A continuación se muestra en la siguiente figura la clasificación de los dispositivos de la red inalámbrica ZigBee:



**Figura 2. 18 Clasificación de dispositivos ZigBee**

Dispositivo de funcionalidad completa: También conocido como nodo activo. FFD (Full-function devices) es capaz de recibir mensajes en el formato del estándar IEE 802.15.4 y pueden funcionar como coordinador principal o como coordinador PAN.

Dispositivo de funcionalidad media: Conocido también como nodo pasivo. RFD (Reduced-function device) comprende básicamente a todos los sensores o actuadores de la red y tiene capacidad y funcionalidad reducida con el fin de obtener bajo coste y gran simplicidad.

El Coordinador ZigBee es el dispositivo más completo y su función es la de formar una red. Se encarga de controlar la red y todos los caminos que deben seguir los dispositivos para comunicarse entre ellos.

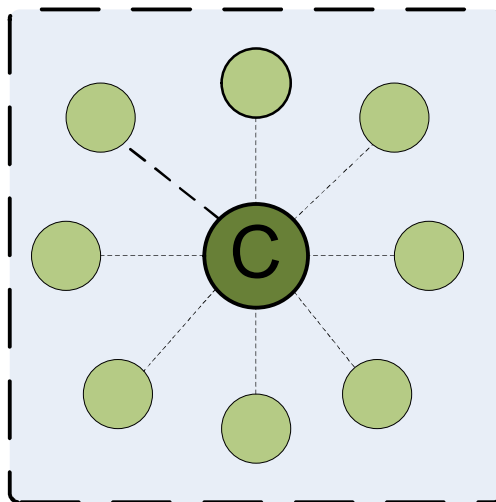
El Router Zigbee es un nodo que mantiene información sobre la red para determinar cuál es la mejor ruta para encaminar un paquete. Además interconecta dispositivos separados en la topología de la red.

El Dispositivo final posee la funcionalidad necesaria para comunicarse con su nodo padre (Coordinador o Router) pero no la capacidad de encaminar paquetes. Generalmente es alimentado por una batería pero su consumo es mínimo debido a que no realiza funciones de enrutamiento.

## TOPOLOGÍA

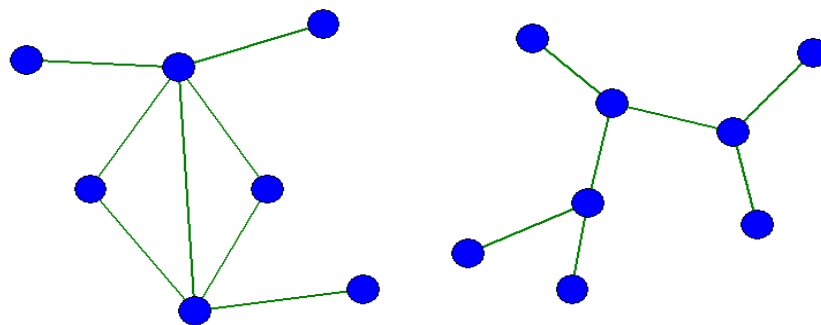
La formación de una red se maneja en la capa de red Zigbee. Ésta debe estar en una de las dos topologías especificadas en el estándar IEE 802.15.4: estrella y punto a punto.

En la topología estrella, mostrada en la figura 2.19 Cada dispositivo en la red puede comunicarse solo con el coordinador Zigbee. Un escenario típico en la formación de una red tipo estrella es cuando un FFD, programado como coordinador ZigBee, se activa y empieza a establecer su red. Éste asume el rol de coordinador de red y es responsable de inicializar y mantener los dispositivos en la red. El resto de dispositivos, conocidos como finales, se comunican directamente con el coordinador.



**Figura 2. 19 Topología estrella**

En la topología punto a punto, cada dispositivo puede comunicarse directamente con cualquier otro (ver figura 2.20), siempre y cuando los dispositivos sean colocados lo más cercano posible para establecer un correcto enlace de comunicación. Cualquier dispositivo FFD en una red punto a punto puede trabajar como coordinador. Una manera de decidir cuál será el coordinador es seleccionando primero el dispositivo FFD que inicie la comunicación como coordinador. En una red de este tipo, todos los dispositivos que participan en la recepción de mensajes son FFDs debido a que los RFDs no son capaces de recibirlos, sin embargo, un dispositivo RFD puede formar parte de la red comunicándose solo con un dispositivo en particular de la red (coordinador o router).



**Figura 2. 20 Ejemplos de topología Punto a Punto**

Una red punto a punto puede tomar diferentes formas, definiendo restricciones en los dispositivos que pueden comunicarse con otros. Si no hay restricción, la

red punto a punto se la conoce como topología mesh o malla. Otra forma de red punto a punto que Zigbee soporta es la topología de árbol, como se muestra en la figura 2.21 .En este caso un coordinador ZigBee establece la red inicial. Los routers forman la rama y transmiten los mensajes. Los dispositivos finales actúan como las hojas de los árboles y no participan en el enrutamiento de mensajes.

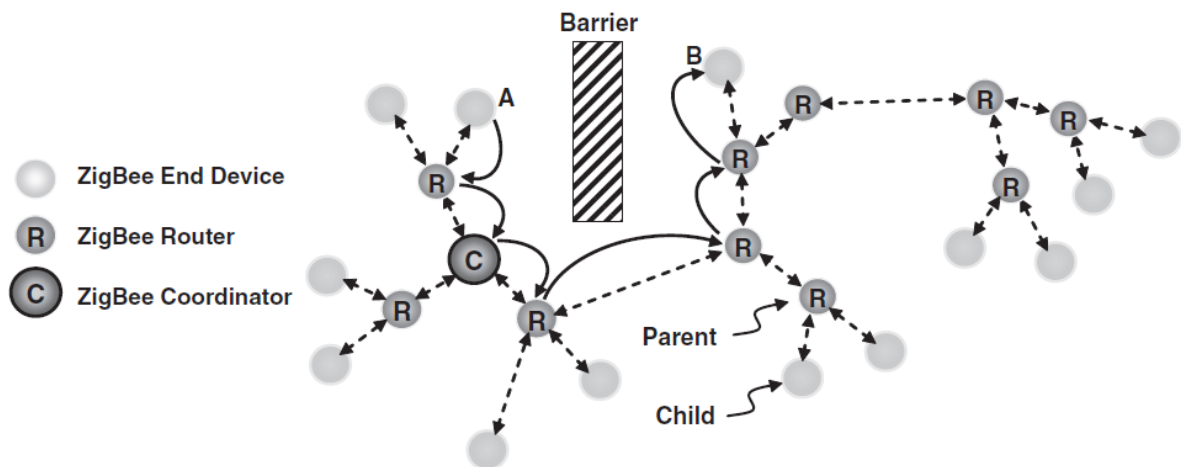


Figura 2. 21 Topología tipo árbol Zigbee [5]

<sup>5</sup> Tomada del Libro ZigBee Wireless Networks and Transceivers, Farahani Shahin, Newnes

## ACCESO AL CANAL

Hay dos métodos para acceder al canal: Basado en argumentos o libre de argumentos.

En el acceso al canal basado en argumentos, todos los dispositivos que quieran transmitir en la misma frecuencia del canal emplean el mecanismo CSMA – CA y el primero que encuentre el canal libre empieza a transmitir. En el método libre de argumentos, el coordinador Zigbee asigna un intervalo de tiempo específico a un dispositivo en particular. Esto es llamado *Intervalo de tiempo garantizado* o GTS. Además, un dispositivo que tenga asignado un GTS empezará a transmitir durante ese intervalo GTS sin necesidad de emplear el mecanismo CSMA – CA.

Para asignar un GTS, el coordinador Zigbee necesita asegurarse que todos los dispositivos en la red estén sincronizados. Baliza es un mensaje con formato específico que se usa para sincronizar los relojes de los nodos en la red. Un coordinador tiene la opción de transmitir señales balizas para sincronizar los dispositivos que se encuentran en él. Esto es llamado Entorno con baliza. La desventaja de usar balizas es que todos los dispositivos de la red tienen que “despertarse” con un sistema regular, escuchar la baliza, sincronizar sus relojes, y finalmente regresar a “dormir”. Esto significa que algunos dispositivos en la red pueden “despertarse” sólo por sincronización y no realizar una tarea mientras

estén activos. Además la duración de la batería en una red con entorno baliza es generalmente menor que en una red sin baliza.

Una red en la cual el coordinador no transmita balizas es conocida como entorno sin baliza. Esta red no tiene intervalos GTS ni periodos libres de argumento porque los dispositivos no pueden sincronizarse con otros. La duración de la batería es notablemente mejor que en una red con baliza debido a que en estos entornos los dispositivos no se “despiertan” a menudo.

## **APLICACIONES**

La red ZigBee tiene diversos campos de aplicación, como se aprecia en la figura 2.22, no solo se limita a usos como Automatización de hogares, sistemas de rastreo o recolección de datos médicos. Los protocolos ZigBee están definidos para su uso en aplicaciones embebidas con requerimientos muy bajos de transmisión de datos y consumo energético. Se pretende su uso en aplicaciones de propósito general con características auto organizativas y bajo coste (redes en malla, en concreto). Puede utilizarse para realizar control industrial, albergar sensores empotrados, domótica o ejercer labores de detección de humo o de intrusos. La red en su conjunto utilizará una cantidad muy pequeña de energía

de forma que cada dispositivo individual pueda tener una autonomía de hasta 5 años antes de necesitar un recambio en su sistema de alimentación.



**Figura 2. 22 Diversos campos de aplicación ZigBee**

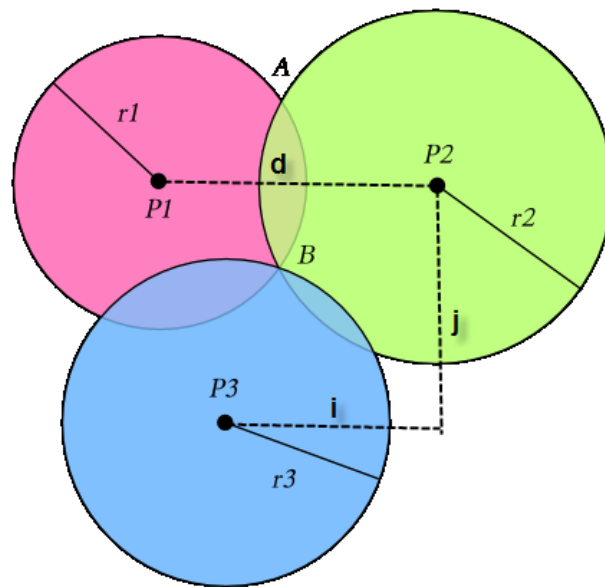
En general, ZigBee resulta ideal para redes estáticas, escalables y con muchos dispositivos, pocos requisitos de ancho de banda, y dónde se requiera una duración muy prolongada de la batería. En ciertas condiciones puede ser una buena alternativa a otras tecnologías inalámbricas como Wi-Fi y Bluetooth. Pero la introducción de ZigBee al mercado no acabará con otras tecnologías ya establecidas, sino que convivirá con ellas y encontrará sus propias aplicaciones.



## 2.4 MÉTODO MATEMÁTICO DE LOCALIZACIÓN EN DOS DIMENSIONES

Una de las aplicaciones en las redes inalámbricas de bajo coste es determinar aproximadamente la localización física de algún objeto en tiempo real. La estimación de la posición se refiere al proceso de obtener información de la localización de un nodo con respecto a un conjunto de referencias de posiciones conocidas. En un ambiente abierto con alta probabilidad de línea de vista y bajos efectos de pérdidas de trayectoria, es posible usar un simple algoritmo de estimación de posición basado en RSSI. Para el desarrollo de este proyecto se utilizará la técnica de trilateración como método matemático de localización.

Tritateración, como se observa en la figura 2.23, es el proceso de calcular la posición de un punto, dadas las distancias entre este y un conjunto de balizas fijas con posiciones conocidas. Se requiere el uso de la técnica de trilateración para los dispositivos inalámbricos que empleen datos RSSI, los cuales deben ser configurados previamente. Ésta consiste en la determinación de la dirección de las señales y luego en el cálculo de la intersección de las mismas. La idea es que una red de sensores detecte señales de un dispositivo inalámbrico y reporte la intensidad de la señal de éste.



**Figura 2. 23 Método de Trilateración**

Este método obtiene la posición de una terminal determinando cuál es la dirección y cuáles son sus intersecciones. Esto requiere de por lo menos tres medidas de intensidad de señal, lo que significa que estas deben estar colocadas en distancias aproximadas. La distancia de cada sensor se determina asumiendo que un dispositivo, con una intensidad de señal dada, está a una cierta distancia del sensor.

Primero, asuma que la posición de las  $n$ -balizas  $x_i = (x_i, y_i), i = 1, 2, 3, \dots, n$  y las distancias  $r_i, i = 1, 2, 3, \dots, n$  entre ellas y el punto  $x = (x, y)$  son exactos. Cada distancia es una ecuación y puede ser escrita como una matriz:

$$A = \begin{bmatrix} (x_1 - x) & + & (y_1 - y) \\ (x_2 - x) & + & (y_2 - y) \\ \vdots & & \vdots \\ \vdots & & \vdots \\ (x_{n-1} - x) & + & (y_{n-1} - y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1^2 \\ r_2^2 \\ \vdots \\ \vdots \\ r_n^2 \end{bmatrix}$$

Eliminando la última ecuación de las demás y empleando algunas manipulaciones algebraicas se obtendrá como resultado las matrices que se muestran en las siguientes fórmulas:

$$A \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = B, \text{ donde}$$

$$A = \begin{bmatrix} (x_1 - x_n) & (y_1 - y_n) \\ (x_2 - x_n) & (y_2 - y_n) \\ \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots \\ (x_{n-1} - x_n) & (y_{n-1} - y_n) \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} (x_1 - x_n) & (y_1 - y_n) \\ (x_2 - x_n) & (y_2 - y_n) \\ \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots \\ (x_{n-1} - x_n) & (y_{n-1} - y_n) \end{bmatrix}$$

Este es un sistema cuadrado mínimo que puede ser usado para estimar la posición  $(x, y)$  usando la siguiente fórmula:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = X = (A^T A)^{-1} A^T B$$

Aumentando el número de nodos fijos podría mejorar la precisión de la estimación de posición en algunas aplicaciones. También es posible comprometer solo a los nodos cercanos en la estimación de la posición. El valor RSSI del paquete recibido por cada nodo de soporte indica la distancia entre los

nodos. Si un nodo de soporte recibe un paquete de un nodo rastreado como parte del proceso de estimación de la posición, el nodo soporte solo participa en la estimación de la posición si el valor de RSSI del paquete recibido es alto en un cierto límite. Modificando el límite RSSI, se aumenta o se disminuye el número de nodos de soporte que participan en la estimación de posición.

## **CAPÍTULO 3**

# **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN ELECTRÓNICA DEL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO LOCAL**

### **3.1 BASES PARA EL DESARROLLO DEL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO**

#### **LOCAL**

Es de gran importancia, en el desarrollo de un sistema de posicionamiento local, tener en cuenta ciertas consideraciones con el fin de evitar posibles errores de diseño en el futuro

Previa a la elección de cualquier dispositivo o elemento se debe tener en cuenta el área donde se va a instalar el sistema de búsqueda local, para este caso se estima que el área de la biblioteca es de  $74\text{m}^2$  y por ser un sistema prototipo se ha considerado el empleo de un solo libro para el desarrollo de las pruebas.

En el libro se colocará un módulo con dimensiones apropiadas al ambiente de trabajo al cual se lo está implementando. Éste enviará señales de posicionamiento a los nodos indicando el lugar donde se encuentra en la biblioteca. Es una tarea de difícil manejo y construcción la correcta colocación de los nodos para este tipo de sistemas puesto que los principales enemigos serán las obstrucciones en la señal que pueden ocasionar las paredes, techos y pisos entre el módulo colocado en el libro y el nodo provocando la reflexión de la señal o una degradación de la misma, pudiendo obtener resultados equívocos.

Para evitar el inconveniente de degradación y reflexión de la señal se colocarán cuatro nodos en las esquinas superiores de la biblioteca y estarán encargados

de enviar la información de posicionamiento al módulo base que estará instalado en la computadora principal de la biblioteca.

Cabe mencionar que la función principal de los nodos en este proyecto es la de actuar como agente mediador entre el módulo colocado en el libro y la base.

Conociendo el área del lugar donde se instalará el sistema y la función de cada uno de sus módulos se procede a la elección de la tecnología para su desarrollo. Para esto se debe tomar en cuenta aspectos como la aplicación que se va a desarrollar, el número de dispositivos que se empleará, rangos y tasas de transferencia y consumo de potencia.

Como ya es de conocimiento, la aplicación que se va a desarrollar es la búsqueda de libros en el centro bibliotecario de la Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación. Esta aplicación requiere el uso de 1 módulo que será colocado en un libro con el fin de enviar la posición, 1 base que estará conectada al computador y 4 nodos colocados en las instalaciones de la biblioteca cuya separación debe ser hasta de 30m entre ellos.

El consumo de potencia en este sistema debe ser mínimo porque éste sólo estará en uso cuando el usuario decida realizar la búsqueda de algún libro. La velocidad de transferencia puede ser baja porque la aplicación no requiere de

velocidades altas para la transmisión de la información y, de preferencia, se trabajaría con frecuencias que operen en la banda libre de 2.4 GHz.

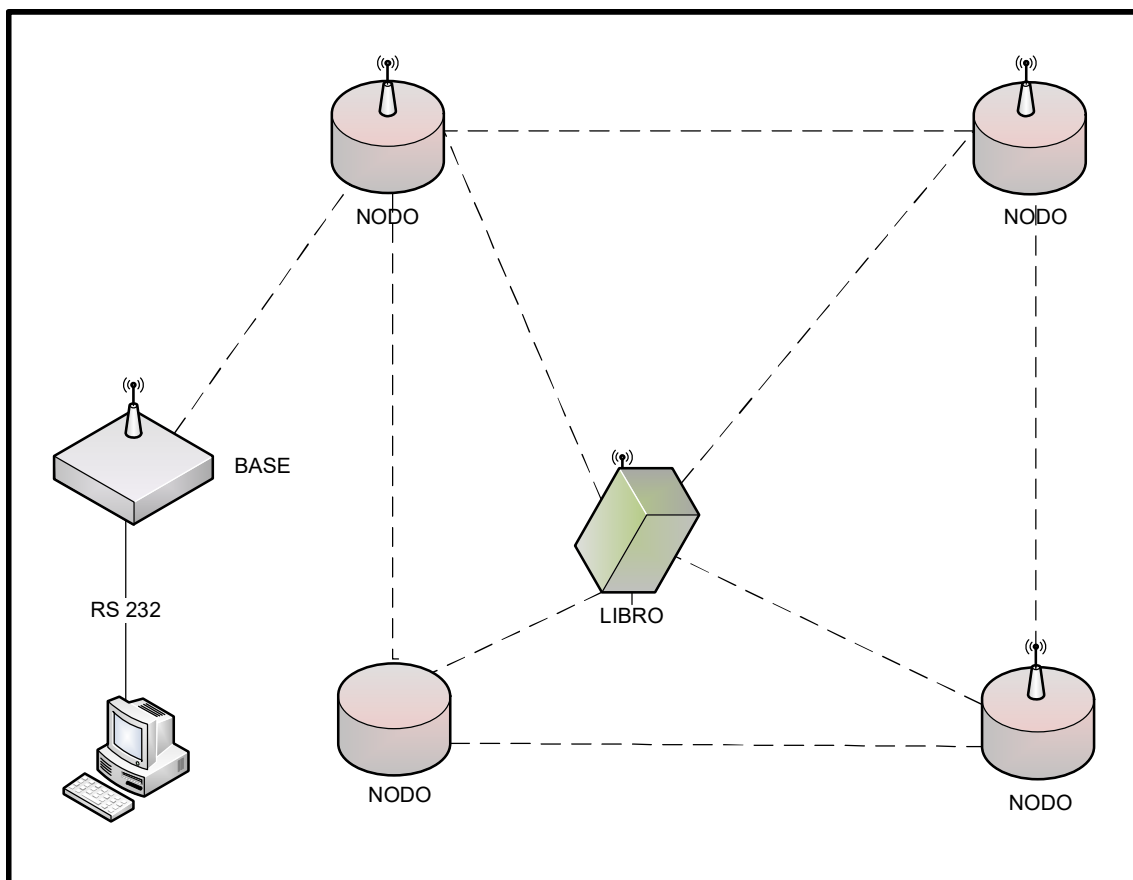
Habiendo analizado esos aspectos se opta por trabajar con tecnología Zigbee que es, para este caso particular, la solución para la comunicación inalámbrica de bajo coste y consumo que se va a desarrollar.

### **3.2. DISEÑO DE LA RED INALÁMBRICA ZIGBEE**

Para envío de la información de posicionamiento del libro es necesario armar una red de telemetría cuyo consumo de ancho de banda sea mínimo. Como se mencionó anteriormente, se ha considerado crear una red inalámbrica con protocolo ZigBee ya que ésta se presta a las necesidades de este proyecto.

A continuación en la figura 3.1 se muestra el diagrama de la red inalámbrica física que será colocada en las instalaciones de la biblioteca FIEC.



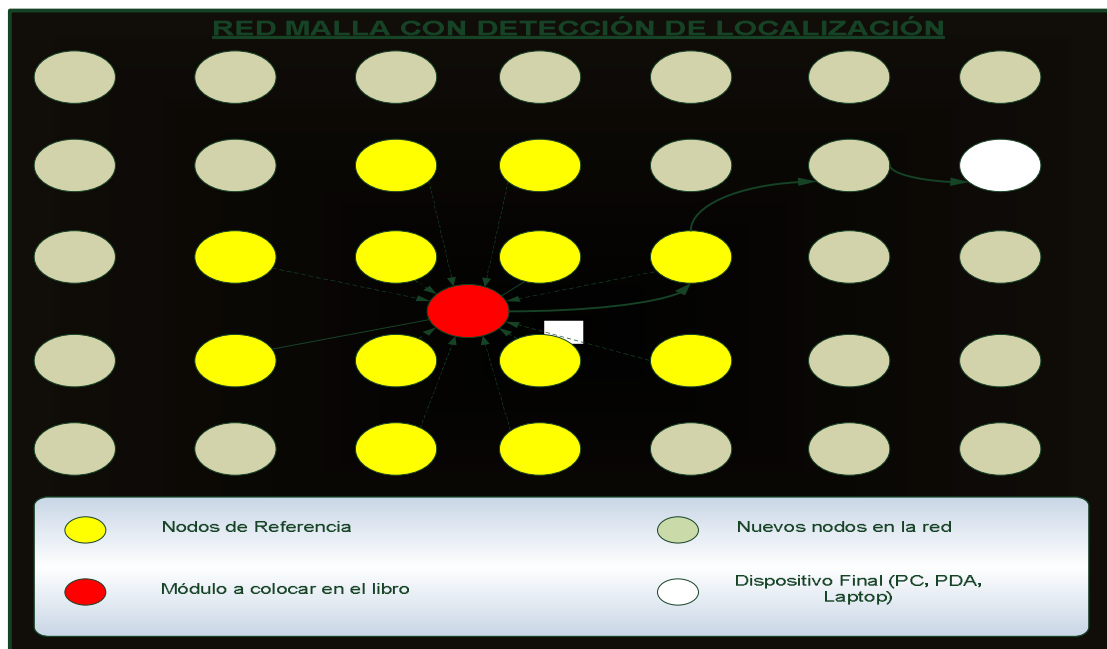


**Figura 3. 1 Diagrama de la red inalámbrica**

La base se comunicará con la computadora por medio de la interfaz RS-232. Ésta recibirá toda la información proveniente de los nodos que estarán colocados estratégicamente para ayudar a calcular la ubicación del libro y recibir la información de posicionamiento de éste.

Debido a que el libro se encuentra en constante movimiento, lo que indica que puede estar en cualquier parte de la biblioteca, se empleará topología punto a

punto sin restricción, conocida también como Mesh o malla. Ésta es una topología de red en la que cada nodo se conecta con los demás, de esa manera es posible transmitir la información de un nodo a otro por diferentes caminos. Un ejemplo de ésta es el que se muestra en la Fig. 3.2.

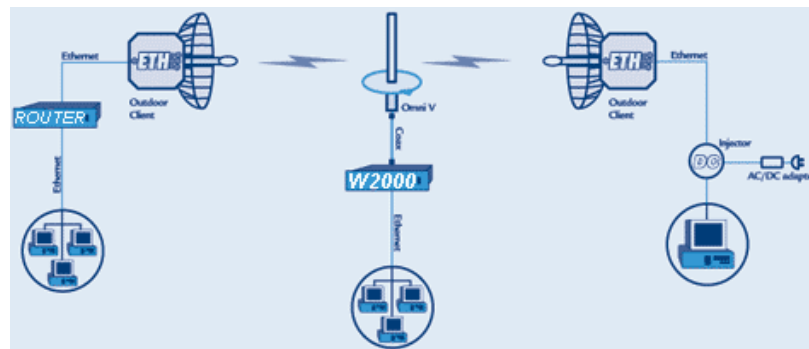


**Figura 3. 2 Ejemplo de red ZigBee usando topología de red Mesh**

Es así que la información de ubicación del libro será enviada de la interfaz móvil hacia los nodos, que ésta a su vez enviará la información punto a punto hacia la base.

Por ser esta una red inalámbrica, el acceso al medio se controlará con el protocolo IEEE 802.11 basado en redes inalámbricas llamado CSMA-CA o

acceso múltiple por detección de portadora con evasión de colisiones. Es un protocolo de control de redes de bajo nivel que permite que múltiples estaciones utilicen un mismo medio de transmisión. Este método, aparte de prevenir colisiones, asegura que el mensaje se reciba correctamente.



**Figura 3. 3 Red inalámbrica con protocolo de acceso al medio CSMA/CA<sup>[6]</sup>**

Antes de transmitir, cada equipo anuncia que va a enviar un mensaje para evitar colisiones entre los paquetes de datos, este es un problema común en redes inalámbricas, ya que estas no cuentan con un modo práctico para transmitir y recibir simultáneamente.

De esta forma, el resto de equipos de la red sabrán cuando hay colisiones y en lugar de transmitir la trama en cuanto el medio está libre, se espera un tiempo aleatorio adicional corto y solamente si, tras ese corto intervalo el medio sigue

<sup>6</sup> Tomada de la página Web [http://www.ferimex.com/en/product.php?Outdoor\\_AP\\_11g](http://www.ferimex.com/en/product.php?Outdoor_AP_11g)

libre, se procede a la transmisión reduciendo la probabilidad de colisiones en el canal.

### **3.3. DESARROLLO ELECTRÓNICO DEL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO LOCAL**

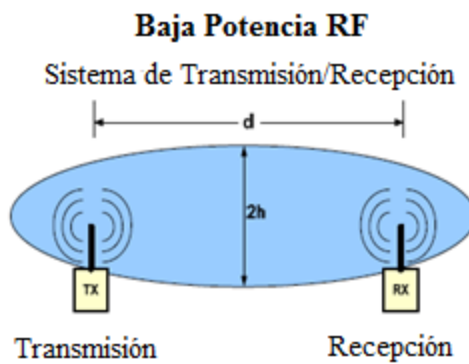
Para la implementación electrónica de este proyecto se debe estructurar el trabajo con respecto al problema, en este caso la parte electrónica debe ser pequeña con respecto a cualquier libro por lo tanto los componentes electrónicos que se usarán para la implementación de los módulos deberán ser de tipo SMD.

Cada módulo presente, tanto en el libro como en los nodos, constará de una antena debido a que utiliza un sistema de radiofrecuencia para la comunicación. Elegir la antena adecuada es una tarea laboriosa ya que se debe tener en cuenta aspectos importantes como: frecuencia de operación, tipo de polarización, Impedancia, etc.

#### **ELECCIÓN DE LA ANTENA**

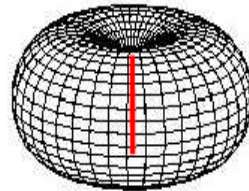
Tener en cuenta los parámetros mencionados anteriormente, es de vital importancia al momento de decidir qué tipo de antena usar en un dispositivo de aplicación inalámbrica.

La antena es un componente esencial para el desarrollo exitoso de un sistema de comunicación inalámbrica. El propósito de ésta es proveer datos de manera electromagnética en el espacio libre, transformando las señales eléctricas en ondas electromagnéticas de radiofrecuencia y propagarlas en el espacio libre (transmisión) o transformando las ondas electromagnéticas de radiofrecuencia en señales eléctricas (recepción).



**Figura 3. 4 Sistema de Transmisión y Recepción en una antena**

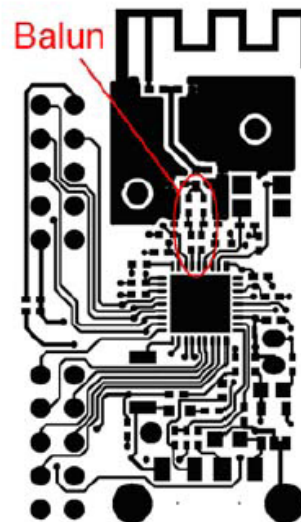
Para el desarrollo de este sistema se ha considerado emplear una antena Dipolo ya que es comúnmente usada en sistemas inalámbricos y puede modelarse de manera similar a una rosquilla. En la figura 3.5 el dipolo representa a una antena direccional con mayor alcance en el plano XY. Su potencia es de 2.14dBi.



**Figura 3. 5 Ejemplo de antena Dipolo**

Cómo conectar la antena es fundamental en los sistemas de radiofrecuencia de baja potencia. Según la conexión, la antena puede ser de un terminal (Single-Ended) o Diferencial. Las antenas de un solo terminal son también conocidas como antenas desbalanceadas cuya impedancia característica es generalmente 50 ohm, mientras que las diferenciales son comúnmente llamadas balanceadas.

Se ha considerado trabajar con una antena Single-Ended porque, aparte que se logra un gran rendimiento, puede ser usada en diseños donde se trabaje con frecuencias de 2.4GHz. Sin embargo, la mayoría de los circuitos integrados de radiofrecuencia tienen puertos diferenciales RF por lo que se requiere una red de transformación para usar la antena anteriormente mencionada. Esta red es llamada balanceada-desbalanceada (balun) ya que transforma las señales de configuración balanceada en desbalanceada. Un ejemplo de red balun se muestra en la siguiente figura.



**Figura 3. 6 Ejemplo de Antena Single Ended con su respectiva red balun**

Según lo descrito anteriormente, se consideró trabajar con una antena tipo Swivel con polarización lineal, destinada para trabajar en redes inalámbricas de gran rendimiento cuya frecuencia de operación sea de 2.4GHz, su impedancia sea de 50 ohm y ganancia de 2.2dBi. Teniendo en cuenta estas características se ha elegido al modelo de antena Titanis B4844 de la compañía ANTENOVA para el buen rendimiento y desempeño de esta aplicación en particular.

### 3.3.1 COMPONENTES ELECTRÓNICOS PARA EL DESARROLLO

#### SoC CC2431 TEXAS INSTRUMENTS

Para la implementación electrónica de este proyecto se ha considerado trabajar con un integrado que soporte radiofrecuencia y que cumpla tanto con las necesidades del proyecto como con las normas del estándar IEEE 802.15.4. A continuación se muestra en la Fig. 3.7 los posibles dispositivos a usarse.

	<b>Path 1</b> Small footprint High integration Location Engine optional	<b>Path 2</b> Flexible Easy to use Reduces time to market	<b>Path 3</b> Ultra-low-power Well known radio Excellent co-existence
<b>Complete ZigBee® Solution</b>	<b>Customer Application</b>	<b>CC2530</b> <b>CC2430/1</b>	Any MSP430 
	<b>Z-Stack™ ZigBee Stack</b>		<b>CC2480 ZigBee Processor</b> 
	<b>Radio</b>		<b>CC2420/CC2520</b> 
<b>Development Kits</b>	CC2530DK CC2430/1ZDK	eZ430-RF2480	CC2420/CC2520 + MSP430ZDK

Figura 3. 7 Integrados de TI que ofrecen soluciones ZigBee [7]

<sup>7</sup> Tomada de la página web [www.ti.com/zigbee](http://www.ti.com/zigbee)

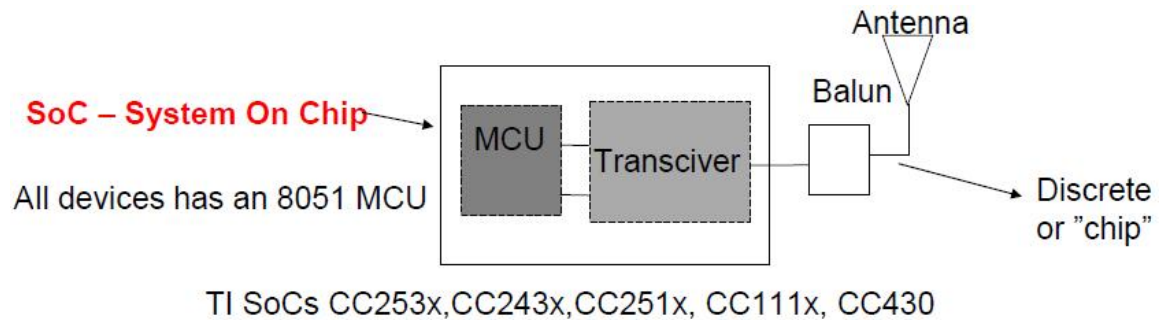


El circuito integrado CC2431 es un componente creado para aplicaciones de redes sensoriales de bajo consumo (Zigbee), tales como rastreo, control de inventario, seguridad, entre otros. Éste es el primer sistema integrado en un chip (SoC) que lanza Texas Instruments y se caracteriza por tener un motor de localización basado en RSSI, lo cual reduce el tráfico en la red comparado con los sistemas de localización tradicionales.

Posee un núcleo transceptor de radiofrecuencia, un microcontrolador 8051 mejorado, memoria flash de 128kB, memoria RAM de 8kB y las dimensiones del empaquetado son de 7mm x 7mm. Una muestra de su estructura se puede observar en la figura 3.8

Entre las principales características de este chip están:

- Motor de localización con cálculos correctos de nodos en una red
- Receptor preciso y robusto frente a las interferencias
- Memoria programable
- Se necesita solo de un cristal para trabajar en sistemas con topología de red Mesh.
- Bajo consumo de corriente (RX: 27mA, TX: 27mA, con cristal de 32 MHz)
- Necesita pocos componentes externos



**Figura 3. 8 Estructura de un SoC. [8]**

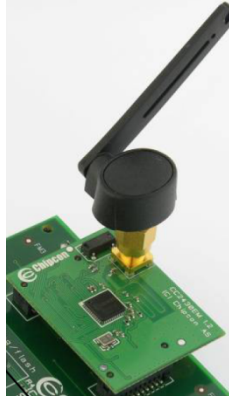
### 3.3.2 SISTEMA RECEPTOR

#### MÓDULO COLOCADO EN EL LIBRO

Como solución al problema de búsqueda de libros dentro de la biblioteca de la facultad, se consideró trabajar con módulos que son usados en los kits de entrenamiento de la compañía "Texas Instruments". Se puede apreciar una imagen de este módulo en figura 3.9.

El diseño electrónico de este módulo está formado por un conjunto de elementos activos, pasivos y el circuito integrado CC2431 con su respectivo cristal.

<sup>8</sup> Tomada de la pagina web [www.ti.com](http://www.ti.com)



**Figura 3. 9 Módulo CC2431 de Texas Instruments**

Como se aprecia en el esquemático de la compañía TI, el componente principal en este diseño es el chip CC2431 de TI. Éste cuenta con la opción de trabajar con dos cristales según la aplicación que se va a desarrollar. El cristal principal es el que se coloca en los pines 19 y 21 pero también puede preconfigurarse como oscilador interno y su uso depende de la frecuencia con la que se trabajará. El segundo cristal, al igual que el primero también puede configurarse como oscilador interno y su colocación física se da en los pines 43 y 44. Éste último se considera como opcional debido a que su uso es para aplicaciones donde se

requiera un consumo muy bajo de potencia, independientemente de la frecuencia elegida.

Consta de dos capacitores de 220nF que, según especificaciones técnicas de TI, evitan las interferencias en el módulo. También posee cuatro modos flexibles de operación cuyo fin es el de reducir el consumo de potencia.

Este módulo cuenta con un circuito Balanceado a desbalanceado –balun– para que transforme las señales balanceadas que manda el SoC2431 y poder enviar la información mediante la antena física que trabaja con señales desbalanceadas.

## **NODOS**

Para el diseño de los módulos que funcionarán como nodos en la red, se ha considerado añadirle al módulo de Texas Instruments un diseño que conste de una fuente de 3.3V. El uso de esta fuente es necesario porque existen ciertos componentes que requieren ser alimentados con otros valores para su correcto funcionamiento.

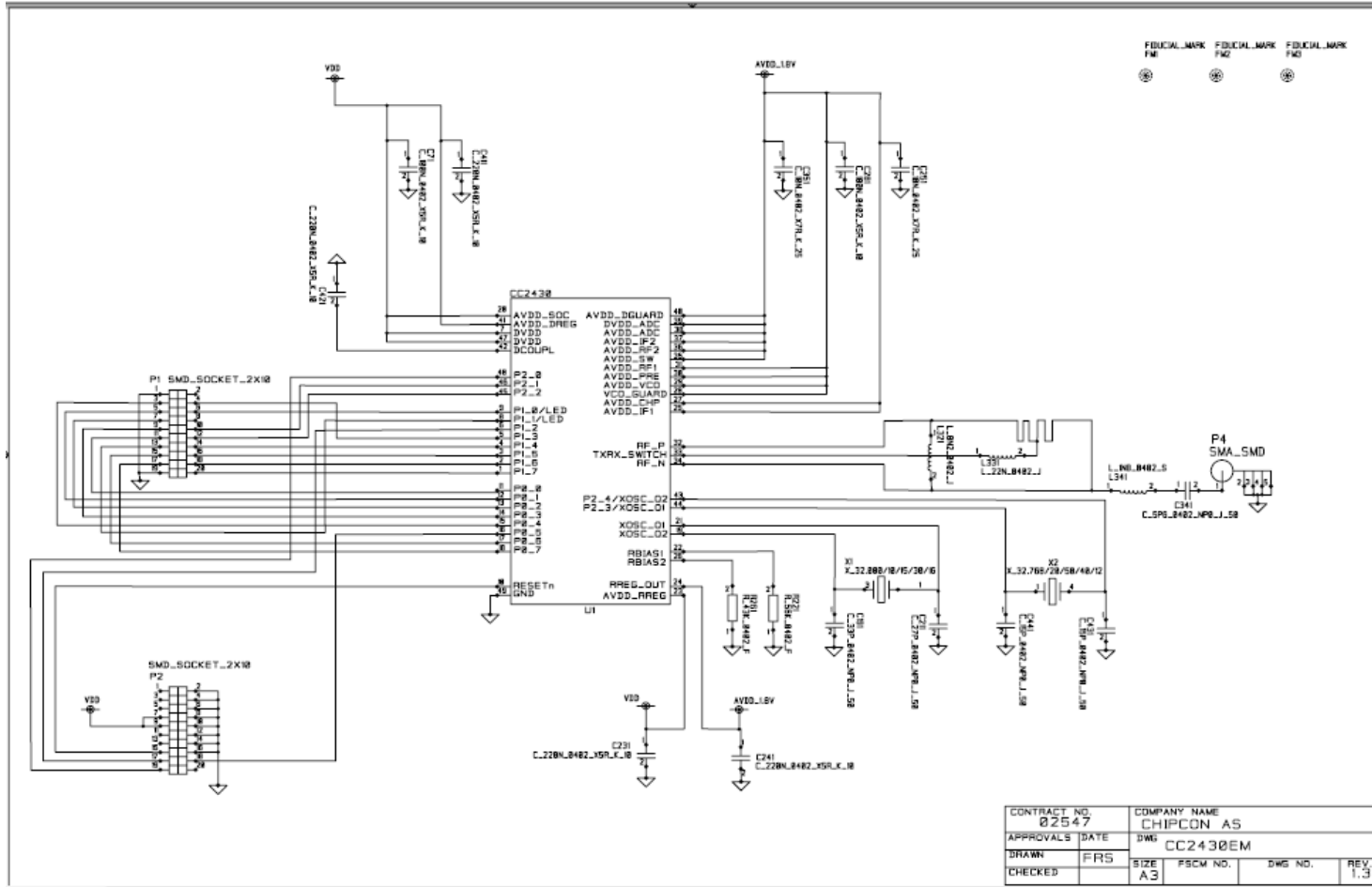


Figura 3. 10 Esquemático del módulo CC2431 de Texas Instruments

Para el diseño de la fuente de 3.3V se ha considerado trabajar con el integrado LM317 debido a que éste es empleado en aplicaciones que necesitan una entrada de voltaje de 1.5V a 15V y consumo de corriente de hasta 1.5A. Los capacitores y el diodo colocados en los pines 2 y 3 sirven para eliminar tensiones alternas residuales, mejorar el rizado y proteger al capacitor colocado en el pin 2 respectivamente.

El integrado LM317 es mayormente empleado en aplicaciones donde se requiera variar la fuente de alimentación. Generalmente se coloca un potenciómetro en la patilla 2 para ajustar el voltaje; en el caso de este proyecto, como solo se necesita una fuente de voltaje fija de 3.3V se colocará un resistor.

Considerando el valor de resistencia de 330 ohm que está colocado a la salida del integrado, se debe tomar en cuenta las siguientes consideraciones para la obtención de un voltaje de salida equivalente a 3.3V.

Se sabe que la tensión entre la patilla de ajuste y de salida es de 1.25V, por lo tanto, la corriente que circulará por la resistencia colocada en la salida será de:

$$I_{Rout} = \frac{V}{R_{out}}$$

Ésta es la misma corriente que circulará por la resistencia de ajuste, entonces, el valor de voltaje en el resistor será:

$$V_{Radj} = \frac{V * R_{adj}}{R_{adj}}$$

Se conoce que el voltaje de salida es:

$$V_{out} = V + V_{Radj}$$

Después de haber realizado los cálculos matemáticos correspondientes se obtiene que el valor de resistencia con la que se trabajará será de:

$$R_{adj} = R_{out} * \left( \frac{V_{out}}{V_{Rout}} - 1 \right)$$

El valor que se obtuvo de la fórmula anterior fue de 541.2 ohm, entonces, acercándolo a su valor comercial, el resistor a usarse en la patilla de ajuste, para obtener un voltaje de salida de 3.3V deberá ser de 560 ohm.

La figura 3.11 muestra el circuito empleado para el desarrollo de los nodos.

### **3.3.3 SISTEMA DE INTERFAZ PC – MÓDULO RECEPTOR**

#### **HARDWARE PC – MÓDULO RECEPTOR**

El SoC CC2431 es quien se encargará de mandar la información de posicionamiento del libro por parte del módulo colocado en éste y los nodos que conforman la red ZigBee recibirán dicha información. Pero está no puede quedar sin procesarse por lo que se necesita otro módulo que recpte la información que el nodo envía para que posteriormente sea mostrada al usuario.

La creación de este nuevo módulo implica desarrollar un circuito capaz de conectarse con el SoC CC2431, que acepte entradas de niveles de voltaje entre 3V a 5V y que transforme la información digital que éste envía (TTL) mediante sus puertos seriales para que, posteriormente, transmita la información por los puertos RS232 de una computadora y finalmente poder visualizar la información.



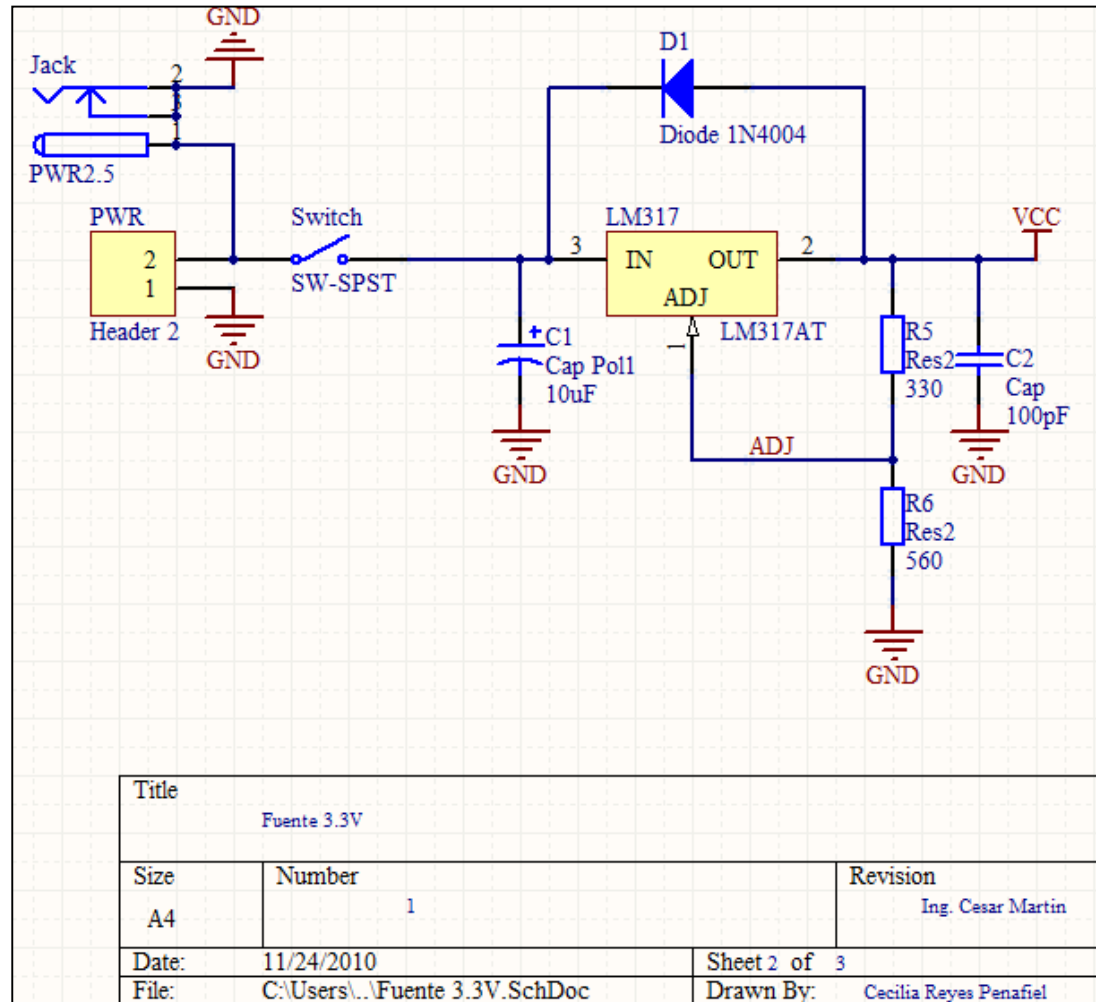


Figura 3. 11 Diseño de fuente de 3.3V

Considerando los aspectos mencionados anteriormente, se ha optado por trabajar con el circuito integrado MAX3232 de la familia MAXIM. Éste es un integrado destinado para aplicaciones que trabajen con estándares de interfaz de comunicación EIA/TIA - 232.

El diseño electrónico conformado por el integrado MAX3232 consta de cuatro capacitores de 0.1uF colocados en las patillas 1 – 3, 4 – 5, 2 y 6 y de un conector db9 tipo hembra colocado en las patillas de entrada y salida RS232.

A continuación se muestra el diseño electrónico para la interfaz PC – módulo receptor.

### **SOFTWARE INTERFAZ PC – MÓDULO RECEPTOR**

Una vez desarrollado el hardware de la interfaz PC, se requiere ahora a la búsqueda o implementación de un software que muestre la información de manera gráfica o textual al usuario.

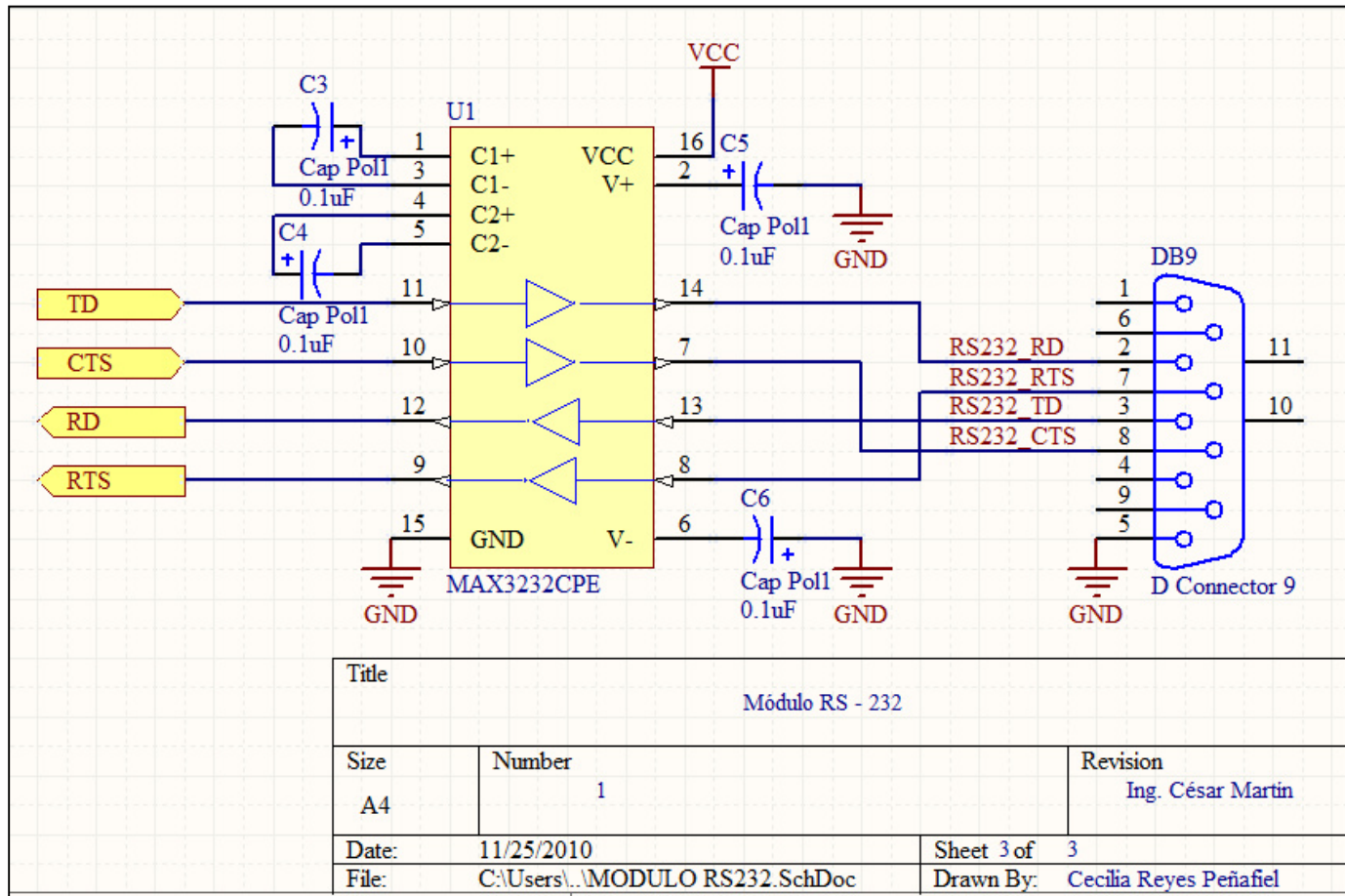


Figura 3. 12 Diseño del módulo RS232

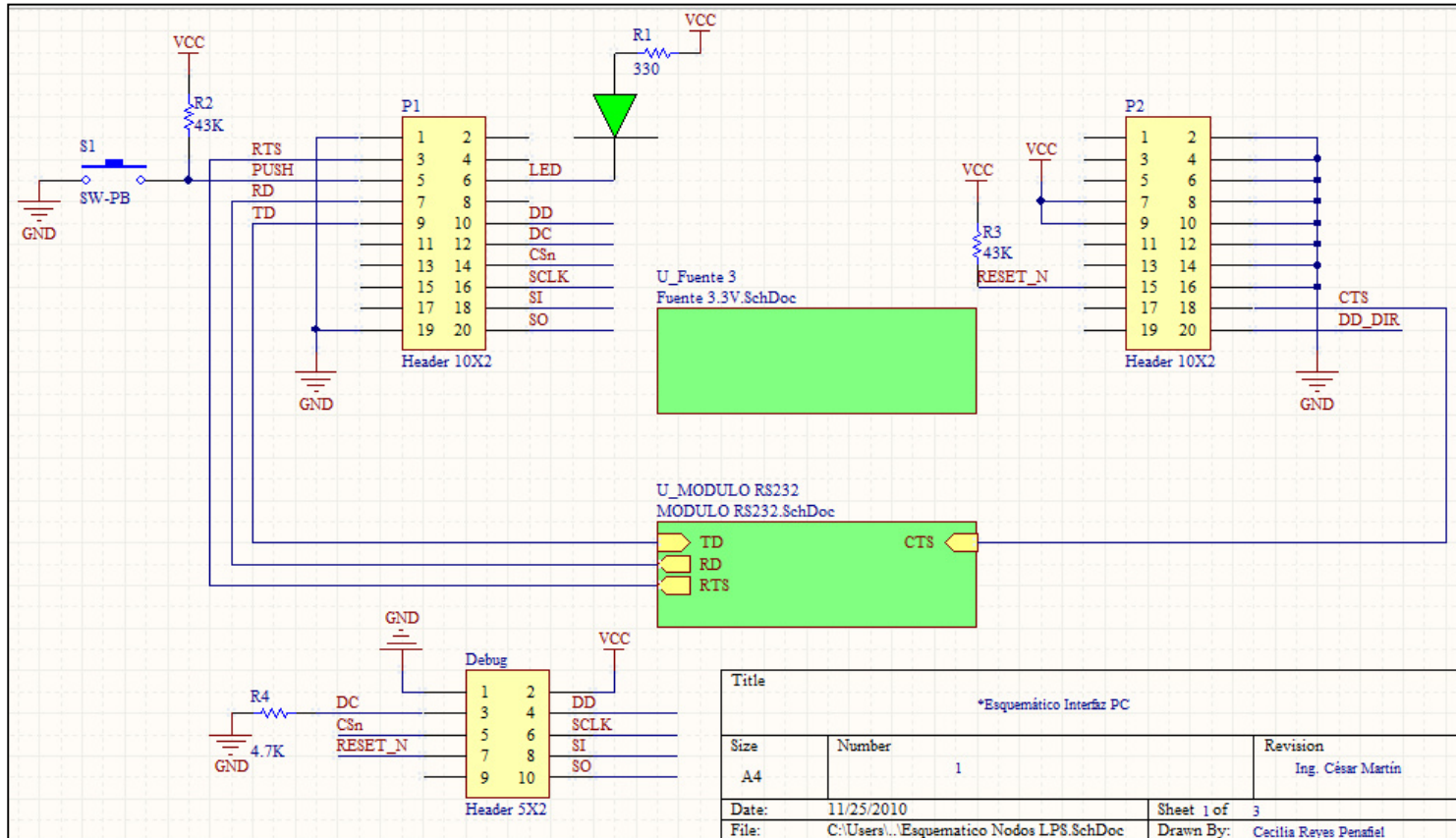
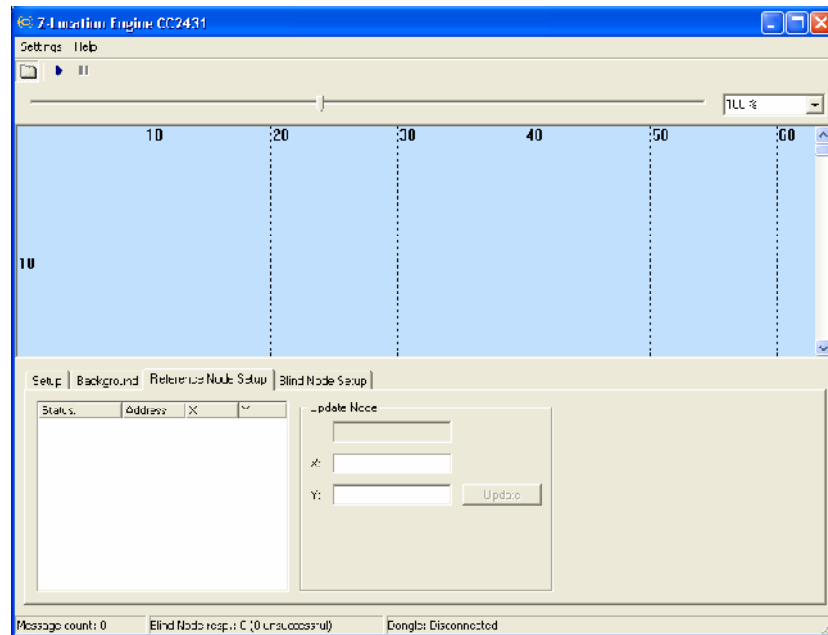


Figura 3. 13 Diagrama general de la interfaz PC – módulos

Texas Instruments, por el hecho de trabajar con un componente de su familia, ofrece facilidades a los desarrolladores de proyectos para la implementación y programación de sus sistemas. Una de las facilidades de usar el SoC CC2431 es el software libre de localización ZigBee llamado Z-LOCATION ENGINE.

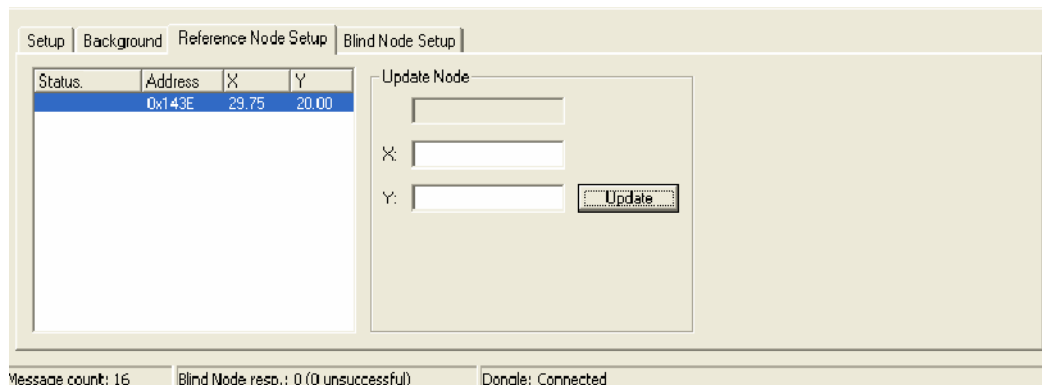
Este es un programa que permite visualizar donde se encuentra en libro con respecto a la posición de los nodos, habiendo anteriormente establecido la ubicación de éstos. La siguiente figura muestra la interfaz de este programa.

Como se observa en la parte inferior de la pantalla, el programa localizador se encuentra desconectado. Antes de inicializar el sistema se debe primero conectar el hardware PC – módulos al puerto RS232 de un computador y encenderlo. En la barra de estados dar clic en el botón PLAY y después de unos segundos la pantalla indicará que se encuentra conectado.



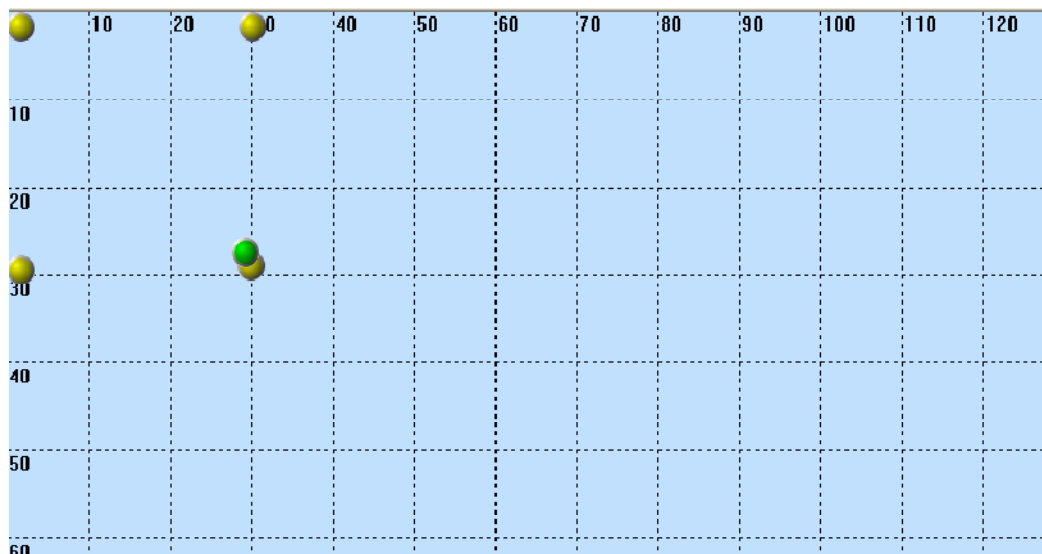
**Figura 3. 14 Pantalla del programa Z-Location Engine**

Posteriormente, se procede a encender uno por uno los nodos que van a conformar la red ZigBee. Si se desea actualizar el valor de las coordenadas, es decir, otorgarle una nueva posición a los nodos, se da doble clic en el nodo a actualizar. Del lado derecho de la pantalla (observar figura 3.15) se ingresan los nuevos valores de las abscisas y ordenadas y se da clic en el botón UPDATE.



**Figura 3. 15 Actualización de la posición de los nodos**

Finalmente se enciende el módulo localizador del libro y para poder observar su posición en la pantalla, se debe colocar cerca de uno de los nodos de referencia. Entonces la pantalla se vería de la siguiente manera:



**Figura 3. 16 Posicionamiento de módulos en la red ZigBee**

### 3.3.4 SISTEMA DE POTENCIA

El tiempo de vida de la batería, para un dispositivo ZigBee, depende en gran medida de la tasa de rastreo y con qué frecuencia se enviará un paquete de datos. Una tasa alta de rastreo representará un alto consumo de potencia.

El consumo por rastreo, sin transmisión de datos es de 128.7 [mA\*ms], según las notas de aplicación de Texas Instruments. El tiempo promedio en el que un dispositivo está despierto durante una secuencia de rastreos sin datos es de 7.05ms.

Cuando hay transmisión de datos, el consumo es de 431.4[mA\*ms] y el tiempo promedio en el que un dispositivo está despierto durante una secuencia de rastreo de información es de 20.23ms.

Es importante recalcar que, el tiempo promedio durante el modo “dormido” debe ser añadido al consumo de potencia en modo “activo”. La duración de cada periodo de “sueño” es el periodo de rastreo menos la duración del modo activo de referencia. El consumo de corriente durante el modo encendido es de 0.5uA según la hoja de especificaciones del SoC CC2431.



El consumo de corriente depende del tipo de batería que se vaya a usar. Si se usa una batería con capacidad de 240mA se tendrá un consumo teórico de corriente promedio por día de 30mA a 40mA.

Para calcular el tiempo de vida de una batería de 9V con una capacitancia de 600mAH, se divide esta última para el valor actual de consumo de corriente. Por tanto, el tiempo de duración de la batería será aproximadamente 20 horas. Estos cálculos son validos en el caso que se envíen paquetes cada segundo.

### **3.4 DISEÑO DEL PLAN DE PRUEBAS**

Para el desarrollo de este proyecto, se ha considerado el diseño del siguiente plan de prueba, en base a la búsqueda de la ubicación de un libro dentro de la biblioteca de la facultad.

- Medición de Alcance máximo de los módulos de Radio Frecuencia
- Pruebas de Margen de Error

## MEDICION DE ALCANCE MAXIMO

Esta prueba es realizada para comprobar los valores teóricos de alcance según el estándar 802.15.4 y para verificar el estado de la señal en las diferentes áreas a trabajar.

## PRUEBAS DE MARGEN DE ERROR

Para esta prueba se ha considerado tener en cuenta lo siguiente:

- Buscar un área estratégica dentro de la biblioteca, de preferencia un área cuadrada
- Ubicar los cuadro nodos en las esquinas del área determinada anteriormente
- Realizar una tabla de datos como la que se muestra:

N° Prueba	UBICACIÓN		IMAGEN
	DENTRO DE LA MESA	FUERA DE LA MESA	

**Tabla 3. 1** Tabla de datos según el número de pruebas

- Para el cálculo del porcentaje de error se realizará una tabla que contenga la siguiente información:

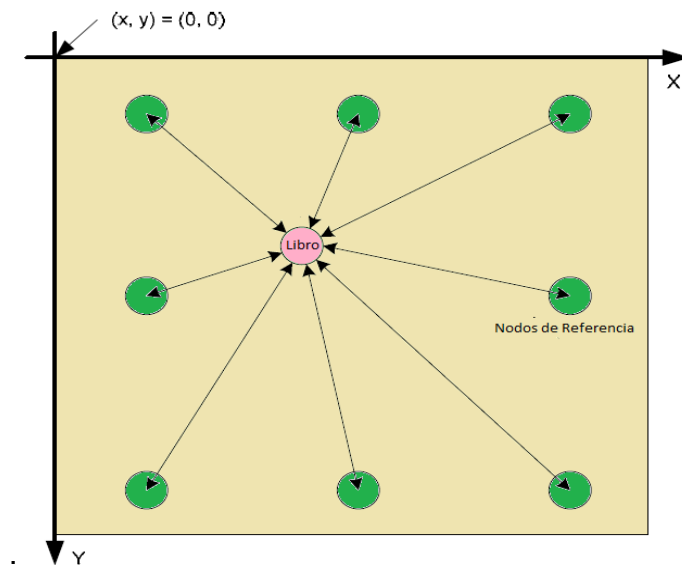
	<b>N° Intentos</b>	<b>N° Aciertos</b>	<b>N° Desaciertos</b>	<b>Error</b>
<b>Prueba 1</b>				
<b>Prueba 2</b>				

**Tabla 3. 2 Tabla de datos correspondiente al cálculo de error**

### **3.5 IMPLEMENTACION COMPLETA DEL SISTEMA**

#### **3.5.1 CÁLCULO DE LA POSICIÓN**

El algoritmo de localización que emplea el SoC CC2431 se basa en valores que indican la intensidad de la señal recibida (RSSI). Esta es una medida de potencia, expresada en dB, presente en las señales de radio, cuya intensidad de fuerza disminuye conforme la distancia aumenta.



**Figura 3. 17 Ejemplo de Estimación de Posición.**

La figura anterior muestra un sistema detector de posicionamiento. El nodo referencia permanece fijo en una posición previamente conocida y en comunicación constante con los demás nodos de la red. Éste no necesita de un detector de posicionamiento porque no realizará ningún cálculo, como se explicó anteriormente, estos tan solo son intermediarios en la red ZigBee.

Es conocido también que, el módulo colocado en el libro es un diseño electrónico basado en el SoC CC2431. Este módulo recogerá las señales provenientes de todos los nodos de referencia, leerá los valores RSSI

correspondientes, colocará los mencionados valores en un dispositivo de posición y finalmente leerá la posición calculada y enviará la información de posición a la interfaz PC – módulos.

## **DISPOSITIVO DE POSICIÓN**

Como se mencionó en la sección 3.3.1, una de las razones de haber seleccionado el SoC CC2431 es por su motor de posicionamiento que posee internamente.

Este motor se usa para estimar la posición de nodos en redes inalámbricas y emplean un algoritmo de posicionamiento que calcula la posición utilizando valores RSSI provenientes de los nodos de referencia. Este motor posee las siguientes características:

- En el algoritmo de posicionamiento, se puede usar de 3 a 16 nodos de referencia para la estimación.
- El tiempo de estimación varía entre 50us hasta 13ms
- El rango de la posición es de 64 x 64 metros
- El arranque del algoritmo de posicionamiento requiere de un uso mínimo de la unidad central de proceso.

El error de posicionamiento depende de algunos factores como el entorno donde viaja la señal, patrón de despliegue de los nodos de referencia y la

densidad de dichos nodos en un área dada. En fin, mientras más nodos de referencia existan en la red, se mejora también la precisión de la estimación de posicionamiento. El motor de localización trabaja localizando al nodo más cercano de la red. La figura 3.18 muestra un diagrama de flujo que detalla el proceso del cálculo de posicionamiento.

Antes de escribir la entrada de datos, el registro que habilita al motor debe recibir un valor alto de lógica positiva. Si este no lo está habilitado, entonces recibe el valor bajo de lógica positiva y se reduce el consumo de potencia mandando a cero la señal de reloj del motor. Una vez habilitado, el algoritmo pregunta si se ha cargado el par ordenado del nodo de referencia más cercano, si es afirmativo, el registro de carga recibirá un valor alto y se procede a guardar la información de posición en una variable llamada coordenadas de referencia.

Ese mismo paso se lo repite según el número de nodos que existan en la red. Cuando llega al último nodo, significa entonces que todos los valores de coordenadas de referencia han sido cargados y el registro de carga de coordenadas tomará el valor de cero.

Después que las coordenadas de referencia han sido cargadas, se debe ingresar un conjunto de parámetros en el motor de localización. Estos

consisten en dos parámetros de radio denominados **A** y **n**, cuatro límites de búsqueda de coordenadas y los valores RSSI.

Estos parámetros son usados en el algoritmo del motor y pueden ser ajustados para describir el entorno de propagación en el que operará la red de dispositivos. El parámetro **A** se define como el valor absoluto de la potencia promedio recibida de la distancia de referencia más cercana expresado en dBm, por ejemplo, si el valor de potencia recibida es de -40dBm, entonces el valor A será igual a 40.

El parámetro **n** se define como el exponente de pérdidas de camino que varía según el entorno de trabajo y describe la tasa en la cual la potencia de la señal decae a medida que la distancia del transmisor aumenta. Este decaimiento es proporcional a  $d^{-n}$  donde  $d$  es la distancia entre el transmisor y el receptor. Este parámetro es escrito en el motor de posicionamiento tanto como un índice entero y como un valor entero con bits no fraccionarios, por ejemplo, si el valor de  $n$  es igual a 7 entonces en el motor de posicionamiento se cargará el valor 00000111.

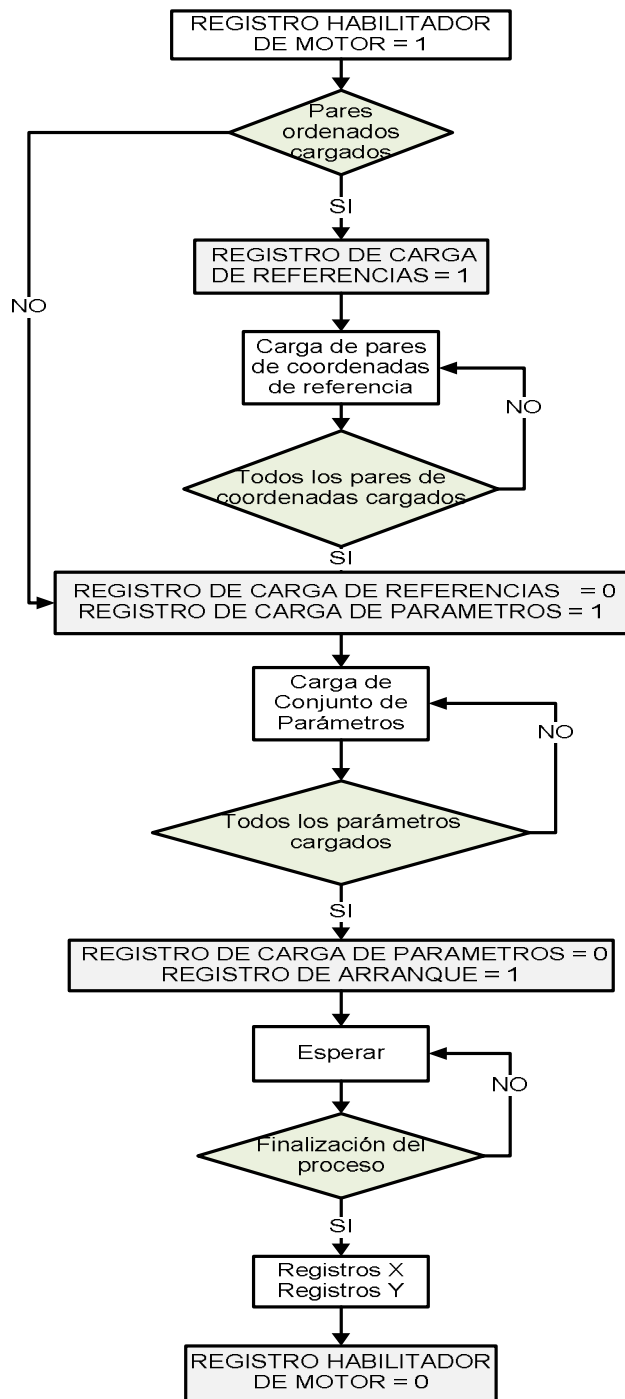


Figura 3. 18 Operación de localización



Es posible reducir el error y el tiempo de estimación estableciendo límites de búsqueda para la estimación de la posición de las coordenadas X e Y. Asuma que la búsqueda en el motor de posición se limita para incluir solamente el área rectangular limitada por las coordenadas  $[X_{min} \ Y_{min}]$  y  $[X_{max} \ Y_{max}]$ . Entonces los cuatro límites de búsqueda de coordenadas se ingresan en el siguiente orden:  $X_{min}, X_{delta}, Y_{min}, Y_{delta}$

Donde: 
$$X_{delta} = X_{max} - X_{min}$$

$$Y_{delta} = Y_{max} - Y_{min}$$

Si uno de estos parámetros llegase a omitirse entonces el motor de posicionamiento no estimará correctamente.

Para terminar con los parámetros de entrada, los valores RSSI corresponden a un conjunto de coordenadas de referencia. Estos valores se representan tanto como valores de un bit como valores signos con complemento a 2. Estos también reflejarán la intensidad de la fuerza de la señal recibida en ese tiempo, no necesariamente corresponde a la potencia de la señal perteneciente al dato recibido.

La tabla 3.3 muestra las especificaciones de los valores máximos y mínimos que los parámetros pueden tomar.

Todos los parámetros descritos anteriormente se cargan en una variable llamada PARÁMETROS EVALUADOS, pero, antes se debe habilitar el registro CARGA DE PARÁMETROS para indicar que un conjunto de parámetros serán escritos. Una vez que empieza el proceso de carga de parámetros, todos los parámetros mencionados anteriormente deben ser ingresados en el siguiente orden:  $A, n, X_{min}, X_{delta}, Y_{min}, Y_{delta}, RSSI_0, RSSI_1, \dots, RSSI_n$ . Una vez que haya finalizado el proceso de carga de parámetros, el registro CARGA DE PARÁMETROS se deshabilita.

NOMBRE	VAL. MIN	VAL. MAX	DESCRIPCIÓN
A	30	50	Valor Absoluto en dBm a un metro lejos del transmisor
n – índice	0	31	Representa el exponente de propagación de la señal. Depende del entorno
RSSI	40	95	Indicador de Fuerza de la Señal Recibida medido en dBm. El valor ingresado es su valor absoluto
X, Y	0	63.75	Representan el valor en metro de las coordenadas relativas de X e Y

**Tabla 3. 3 Parámetros de entrada.**

Finalmente, el valor estimado de la posición de las coordenadas es dado en metros, con una resolución de 0.25m. Cuando las coordenadas de referencia y los parámetros evaluados han sido cargados, se realiza el cálculo de posicionamiento habilitando el registro de Arranque. Las coordenadas estimadas pueden ser leída desde los registros de posición estimada de X e Y. El tiempo de estimación de coordenadas varía entre los 50us y 13ms, utilizando un sistema de reloj de 32MHz. La siguiente tabla muestra los valores de salida que puede tener las variables X e Y.

<b>NOMBRE</b>	<b>VAL. MIN</b>	<b>VAL. MAX</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
X, Y	0	63.5	Valores en metros que representan las coordenadas calculadas relativamente.

**Tabla 3. 4 Salida del motor de posicionamiento**

### **3.5.2 ENVIO DE DATOS EN LA RED ZIGBEE**

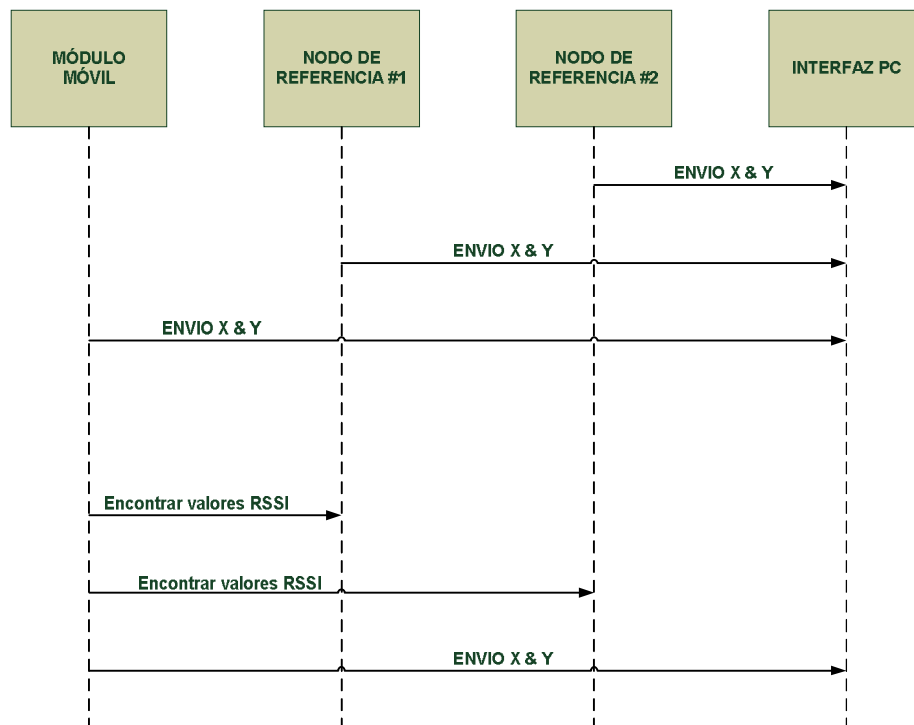
Hay dos conceptos importantes de deben conocerse para poder entender cómo se comunican los dispositivos en la red ZigBee:

- Todos los nodos necesitan enviar una señal al rastreador de paquetes cada intervalo de tiempo, para que el rastreador sepa que el nodo esta

“vivo”. El representante del rastreador de paquetes en la red ZigBee, en este proyecto, es el computador.

- El nodo del libro será el que inicialice toda la comunicación necesaria para recoger todos los valores RSSI de los nodos de referencia.

A continuación, la figura 3.19 mostrará la comunicación en la red ZigBee de manera simplificada.



**Figura 3. 19 Comunicación Simplificada**

El nodo de libro manda ocho mensajes emisores, en un intervalo de 100ms. Después de la fase de emisión, el módulo del libro recogerá los

datos de cada nodo de referencia presente en la red. Éste pide un paquete cada tiempo y esta petición se repite 8 veces por cada nodo de referencia. Finalmente el módulo móvil calcula la posición y la transmite.

Como se mencionó anteriormente, la comunicación es posible gracias al envío de paquetes entre los módulos que conforman la red ZigBee. El formato definido para los diferentes tipos de paquetes se muestra en la siguiente tabla:

Identificación del Paquete	Interpretación	Destino
0x10	Envío de posición del módulo móvil	Interfaz PC
0x11	Solicitud de respuesta del módulo móvil por parte de los nodos de referencia	Emisión / Nodo de Referencia
0x12	Respuesta del nodo de referencia	Módulo móvil
0x20	Establecer parámetros de configuración	Nodos
0x21	Envío de A y N	PC
0x22	Parpadeo del LED	Nodos
0x30	Depuración de texto	Interfaz PC

**Tabla 3. 5 Tipos de paquetes**

Un ejemplo de tramas en el envío de paquetes es como el que se muestra a continuación.

<b>Byte 0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
0x10	X <sub>H</sub>	X <sub>L</sub>	Y <sub>H</sub>	Y <sub>L</sub>	Z

**Figura 3. 20 Trama del paquete “Envío de posición del módulo móvil”**

Esta es una trama correspondiente al paquete “Envío de posición del módulo móvil”. Este paquete es enviado a la aplicación PC por medio del módulo interfaz PC para actualizar la posición de un nodo móvil.

El byte 0 indica la identificación del paquete. Los bytes 1 y 2 representan la parte alta y baja del valor X respectivamente. La misma representación es para los bytes 3 y 4 pero para el valor de Y y el último byte representa a un valor sin signo de 8 bits con 2 bits fraccionarios.

### **PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN**

La capa de acceso al medio (MAC) del estándar 802.15.4 se utiliza como capa de radio en el sistema. Solo una parte limitada de la capa MAC se emplea para la transmisión y recepción de datos. Los canales disponibles para las frecuencias de radio van desde el 0x0B hasta el 0x1A y el canal por defecto es el 0x10 (2430MHz).

El sistema usa únicamente una parte de la capa MAC. La dirección IEEE de ocho bytes no es estrictamente necesaria en esta aplicación. Para distinguir cada nodo, los dos últimos bytes de la dirección IEEE son usados como dirección corta. Si no se encuentra la dirección IEEE entonces se genera una dirección corta aleatoriamente.

Existen tres tipos de comunicación de datos en el sistema:

- Dato enviado entre nodos
- Dato enviado del nodo hacia la interfaz PC
- Dato enviado desde la interfaz PC a otro nodo, caso típico de información de configuración.

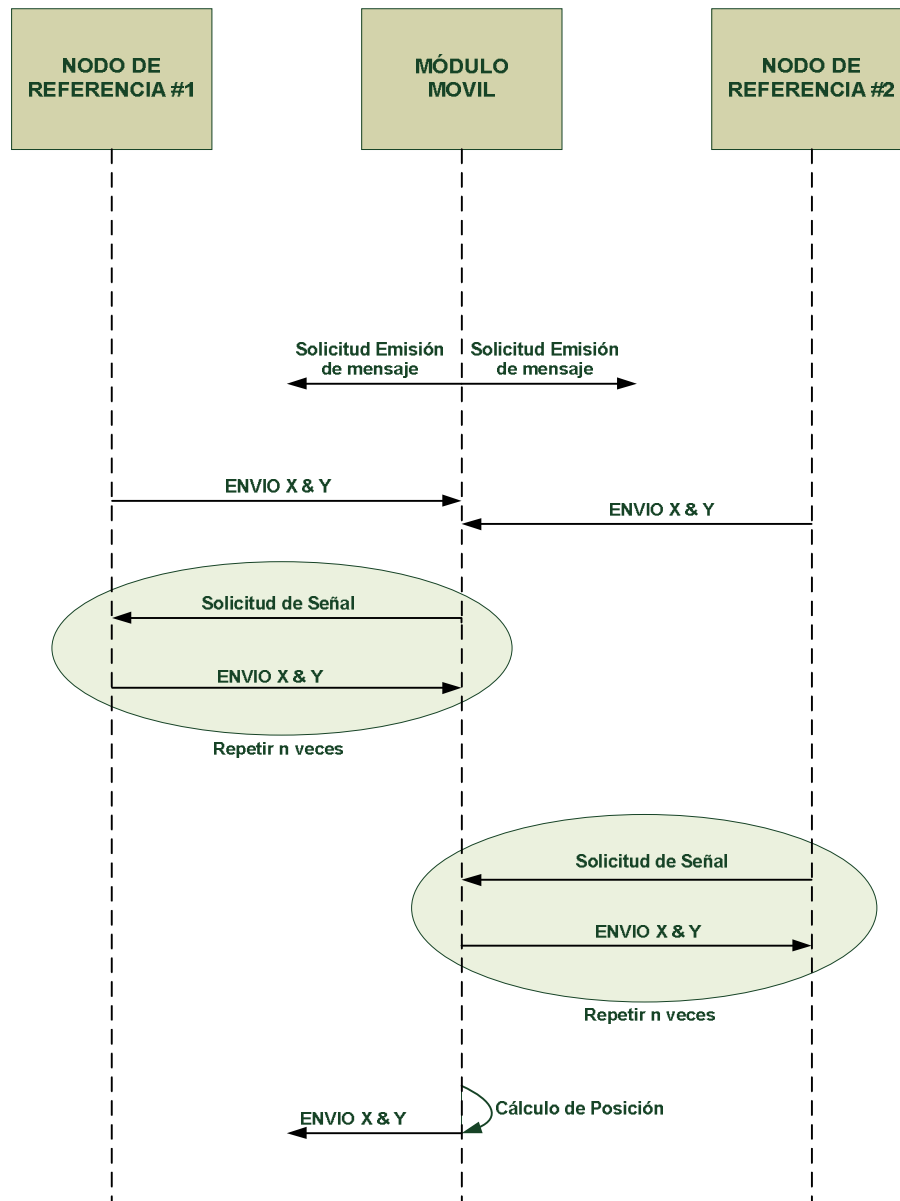
La figura 3.21 muestra como se recogen los datos en la conexión entre nodos.

El módulo del libro emite un mensaje y cada nodo de referencia responderá en orden, repitiéndose este paso algunas veces. Si un nodo de referencia estuviera en estado “dormido” no responderá, sin embargo, es necesario repetir la emisión de mensajes.

El módulo móvil solicita a cada nodo de referencia que haya respondido, el número de paquetes de referencia que por lo general son cuatro u ocho. Los paquetes que tengan un valor RSSI bajo no serán usados. El

valor promedio RSSI se calcula y se coloca dentro del motor de posición.

Después del cálculo, se envía la nueva posición a la interfaz PC.

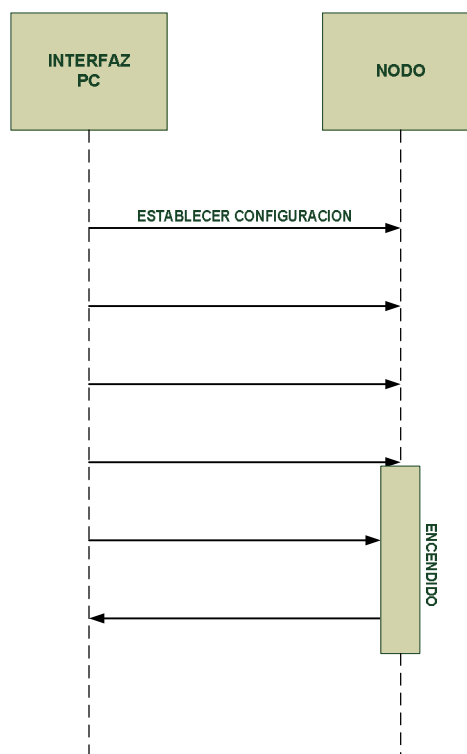


**Figura 3. 21 Comunicación entre nodos**



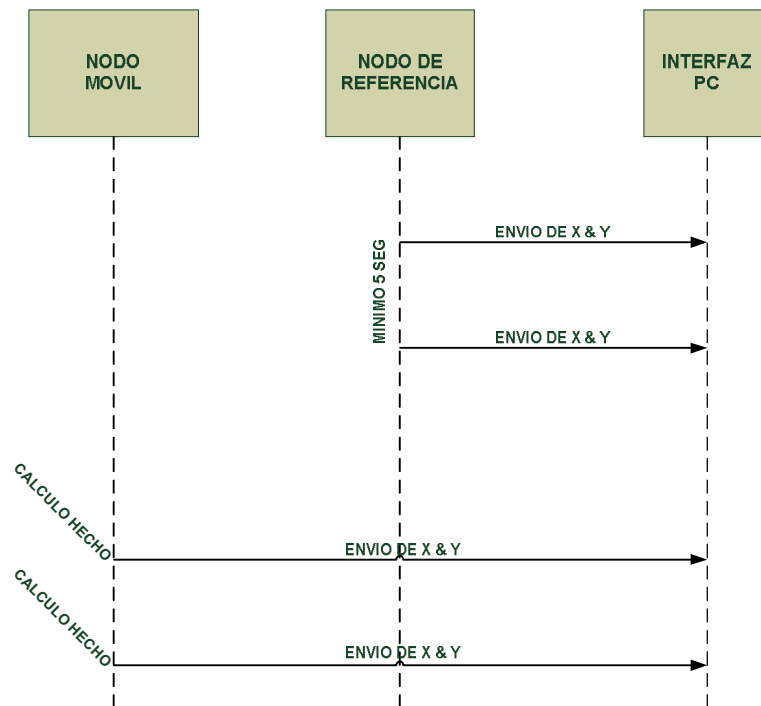
En el caso de la comunicación nodos – interfaz PC, el software rastreador de mensajes provee funciones para actualizar la configuración de cada nodo. A pesar que un nodo pueda estar en estado “dormido”, la configuración de paquetes será de todos modos retransmitida hasta que haya el reconocimiento por parte de ese nodo.

Un ejemplo de lo mencionado se muestra en la figura 3.22. El tiempo de cada reintento es de 200 ms y el número de intentos es de 50.



**Figura 3. 22 Configuración de nodos**

Cada nodo necesita enviar constantemente su propia posición a la interfaz PC y el módulo móvil transmitirá una nueva posición después de cada cálculo. Si la interfaz PC no recibe, por parte de un nodo, ningún paquete en 30 segundos, entonces ese nodo será removido.



**Figura 3. 23 Configuración Nodos – Interfaz PC**

## **CAPÍTULO 4**

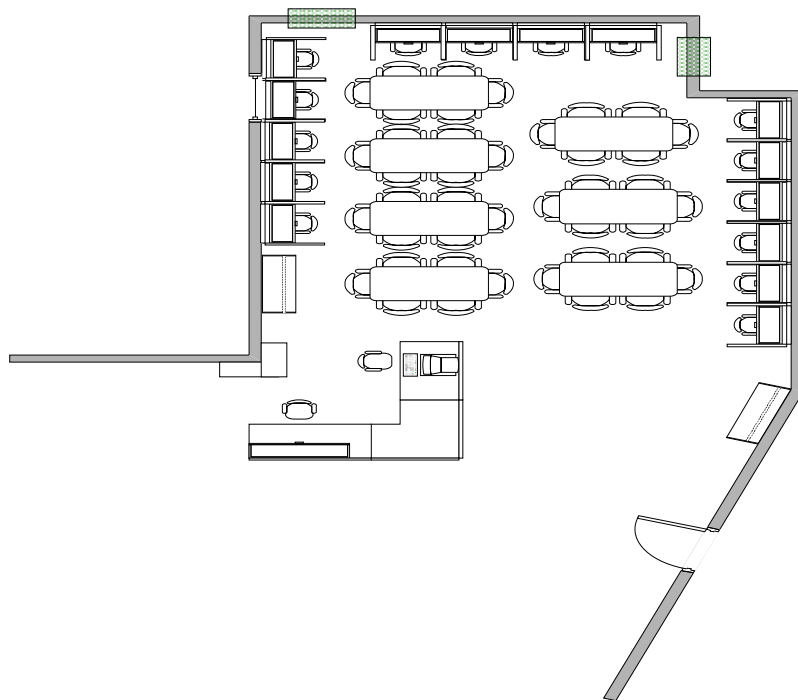
### **RESULTADOS OBTENIDOS**

#### **4.1 MEDICIONES OBTENIDAS EN LAS DIFERENTES PRUEBAS**

El desarrollo de las pruebas se dio en las instalaciones de la Biblioteca FIEC. Siguiendo el plan de pruebas establecido en el capítulo anterior, se comprobaron los valores teóricos de alcance máximo. En esta prueba no se tuvo problema alguno debido a que el área de la biblioteca estaba dentro del rango de alcance máximo que es de 30 metros de separación entre nodos.

Posteriormente se procedió a buscar un área conveniente para la realización de las pruebas y se decidió por trabajar en el lugar donde se encuentran las mesas de estudio de los estudiantes, que es por lo general donde ellos dejan los libros que han prestado en la biblioteca.

Se trabajó en la mesa central de los ayudantes, colocando ahí la interfaz PC – módulos y, posteriormente, los nodos fijos fueron colocados en puntos estratégicos para la buena recepción de la señal. El software empleado para observar el movimiento del nodo móvil y sus coordenadas fue Z-Location Engine, cuyo funcionamiento se explicó en el capítulo anterior. A este software se le cargó una imagen del área donde se trabajó en la biblioteca, diseñada en Microsoft Visio.



**Figura 4. 1 Imagen del área de trabajo de la Biblioteca FIEC**

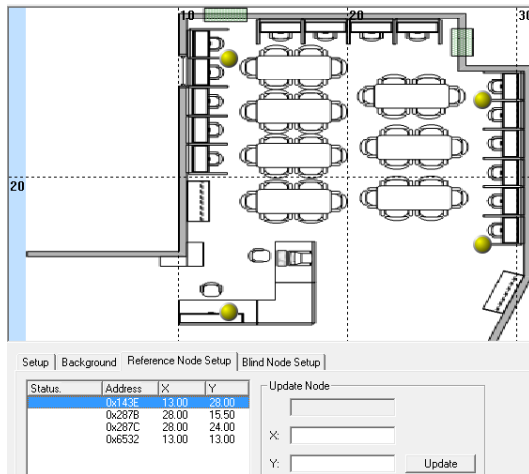
Se consideró realizar dos tipos de pruebas, con el fin de observar la precisión de la posición del nodo móvil y analizar la efectividad de los datos obtenidos. La primera prueba consistió en trabajar con un nodo relativamente lejos de los tres restantes y la segunda prueba fue trabajar con los cuatro nodos cercanos.

La ubicación de los nodos, los datos e imágenes obtenidos en la primera prueba son los que se indican a continuación:

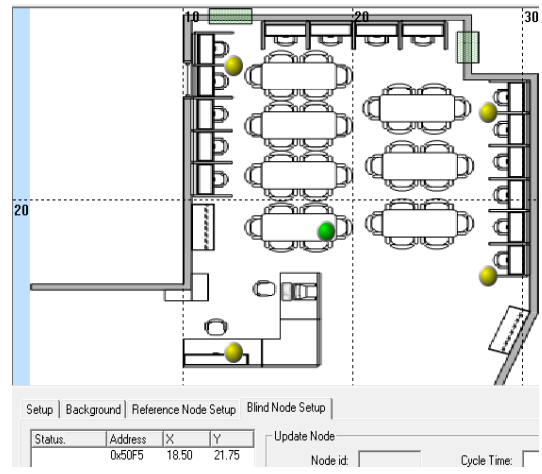
N° Prueba		UBICACIÓN		IMAGEN
		DENTRO DE LA MESA	FUERA DE LA MESA	
P1	a	X		Ver figura 4.3
	b	X		Ver figura 4.4
	c	X		Ver figura 4.5
P2	a	X		Ver figura 4.6
	b	X		Ver figura 4.7
	c	X		Ver figura 4.8
P3	a	X		Ver figura 4.9
	B	X		Ver figura 4.10
	c	X		Ver figura 4.11
P4	a	X		Ver figura 4.12
	b		X	Ver figura 4.13
	c	X		Ver figura 4.14
P5	a		X	Ver figura 4.15
	b	X		Ver figura 4.16
	c	X		Ver figura 4.17

P6	a	X		Ver figura 4.18
	b		X	Ver figura 4.19
	c	X		Ver figura 4.20
P7	a	X		Ver figura 4.21
	b	X		Ver figura 4.22
	c	X		Ver figura 4.23

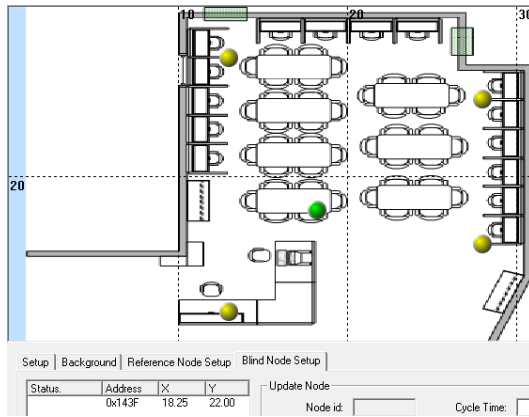
**Tabla 4. 1 Pruebas con un nodo lejano y tres cercanos**



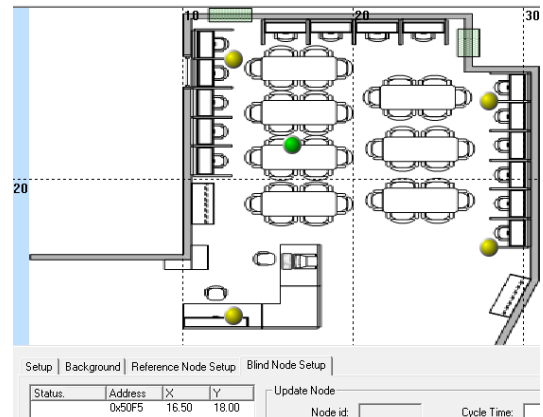
**Figura 4. 2 Ubicación de nodos**



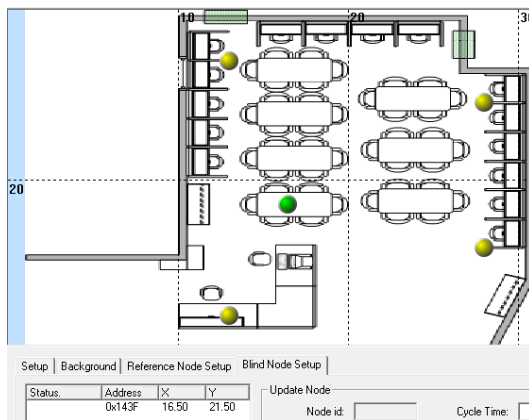
**Figura 4. 3 Prueba #1a**



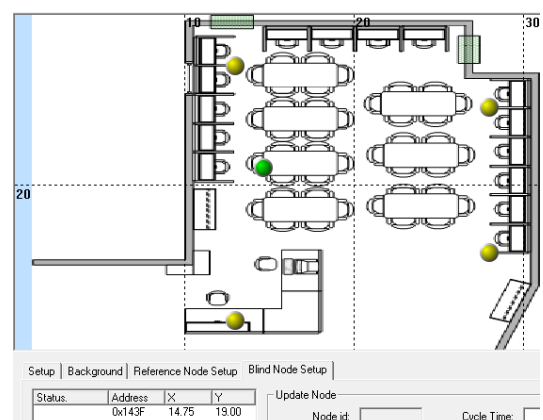
**Figura 4. 4 Prueba #1b**



**Figura 4. 6 Prueba #2a**

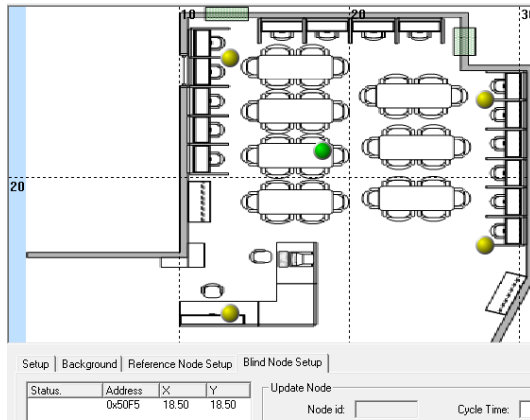


**Figura 4. 5 Prueba #1c**

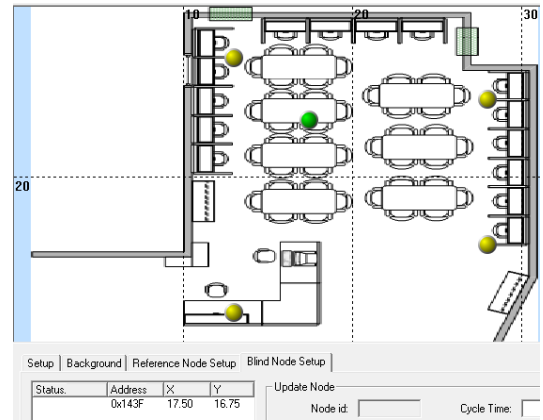


**Figura 4. 7 Prueba #2b**

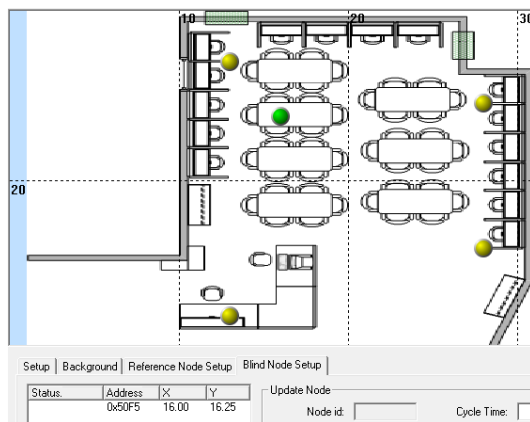




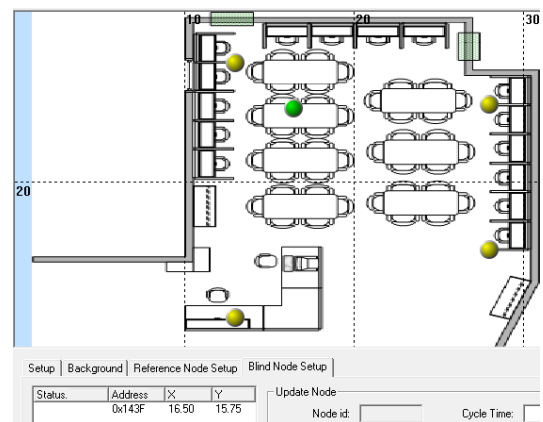
**Figura 4. 8 Prueba #2c**



**Figura 4. 10 Prueba #3a**



**Figura 4. 9 Prueba #3b**



**Figura 4. 11 Prueba #3c**

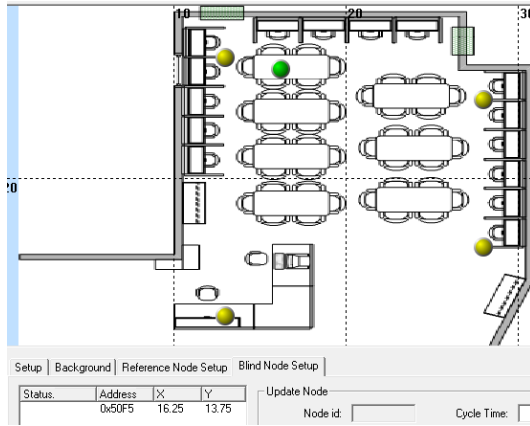


Figura 4. 12 Prueba #4a

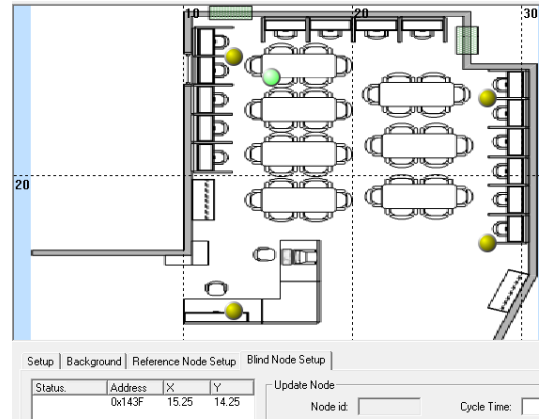


Figura 4. 14 Prueba #4c

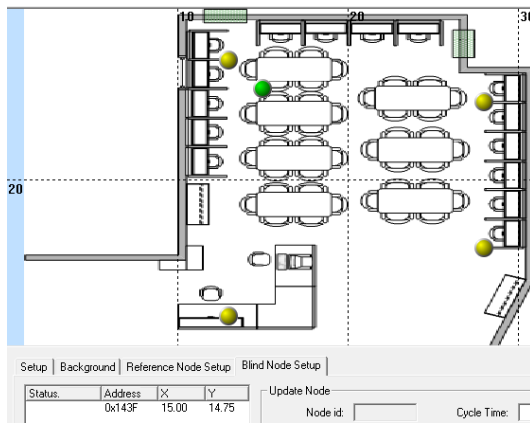


Figura 4. 13 Prueba #4b

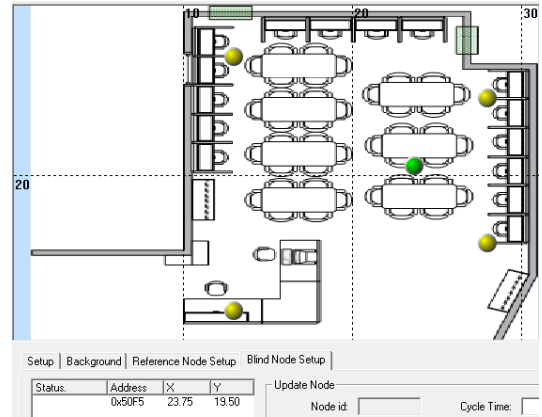


Figura 4. 15 Prueba #5a

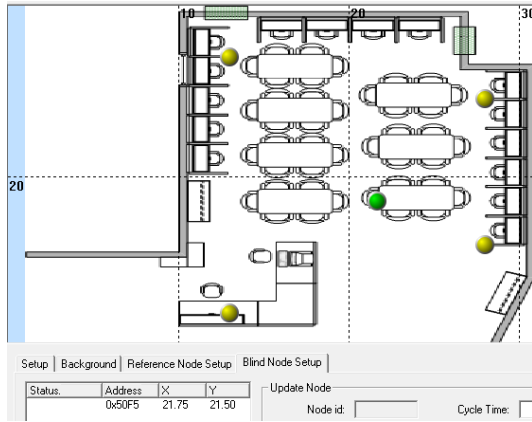


Figura 4. 16 Prueba #5b

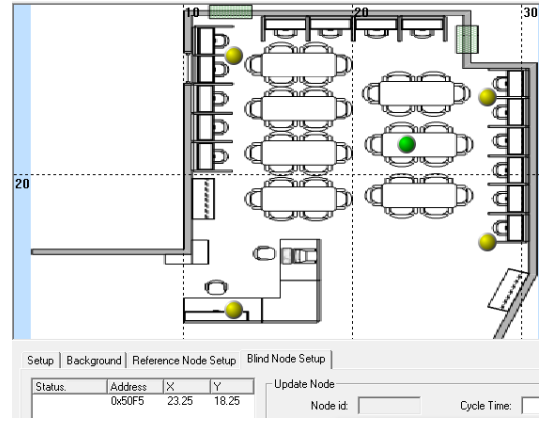


Figura 4. 18 Prueba #6a

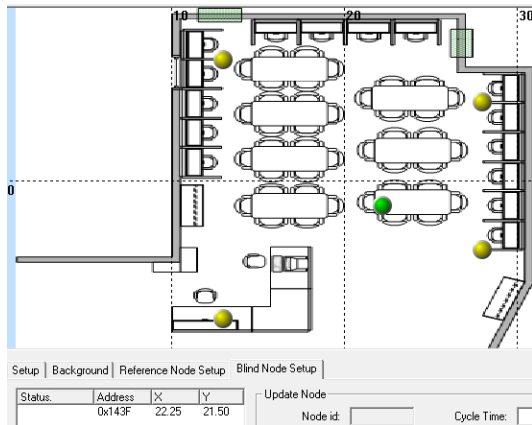


Figura 4. 17 Prueba #5c

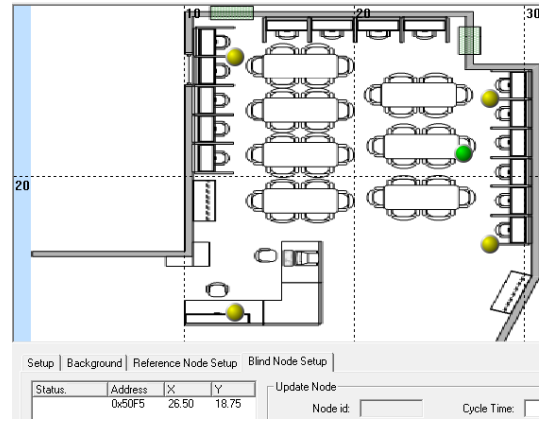


Figura 4. 19 Prueba #6b

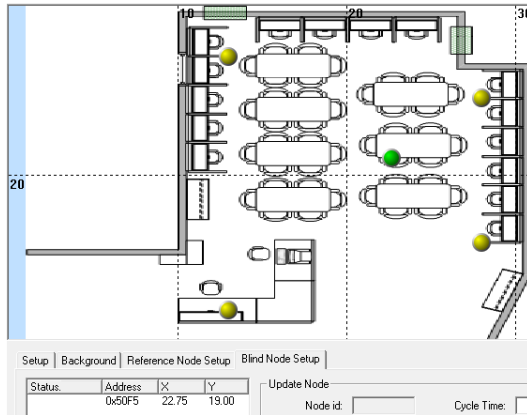


Figura 4. 20 Prueba #6c

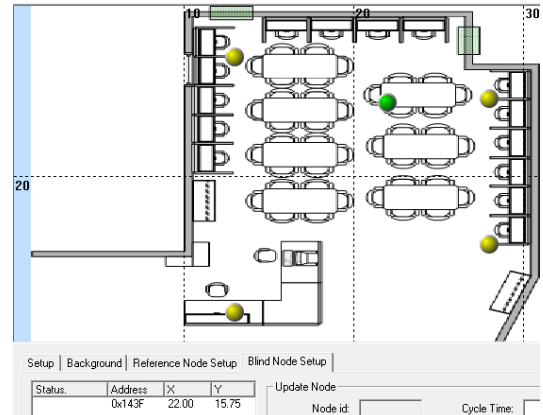


Figura 4. 22 Prueba #7b

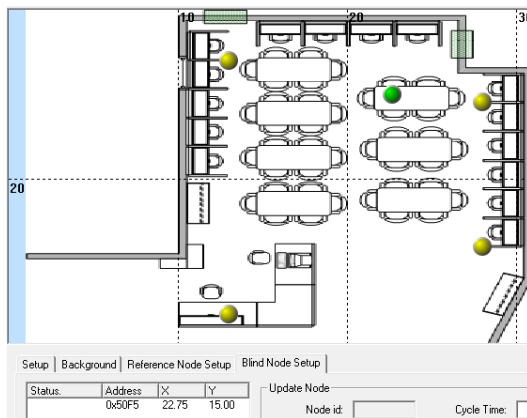


Figura 4. 21 Prueba #7a

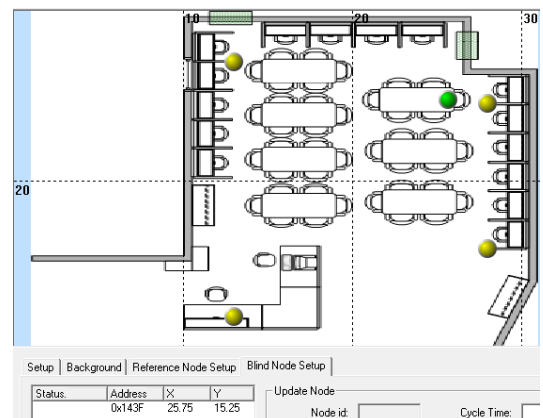


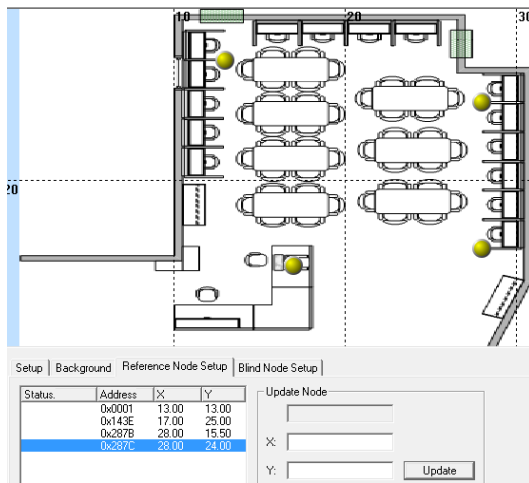
Figura 4. 23 Prueba #7c

Los datos e imágenes obtenidos en la segunda prueba, correspondiente a cuatro nodos cercanos son los que se muestran a continuación:

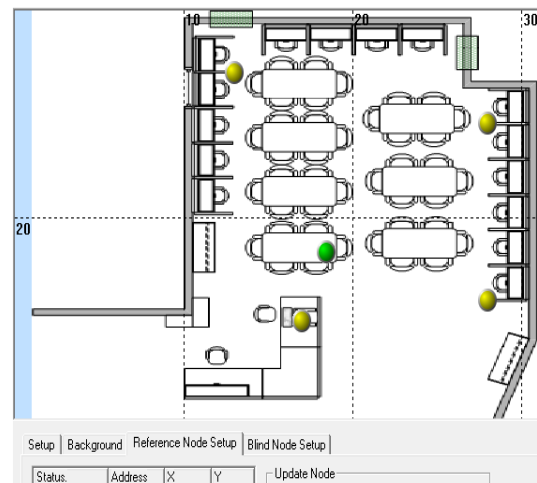
N° Prueba		UBICACIÓN		IMAGEN
		DENTRO DE LA MESA	FUERA DE LA MESA	
P8	a	X		Figura 4.25
	b	X		Figura 4.26
	c	X		Figura 4.27
P9	a	X		Figura 4.28
	b	X		Figura 4.29
	c	X		Figura 4.30
P10	a	X		Figura 4.31
	b	X		Figura 4.32
	c	X		Figura 4.33
P11	a	X		Figura 4.34
	b	X		Figura 4.35
	c		X	Figura 4.36
P12	a	X		Figura 4.37
	b	X		Figura 4.38
	c	X		Figura 4.39

P13	a	X		Figura 4.40
	b	X		Figura 4.41
	c	X		Figura 4.42
P14	a	X		Figura 4.43
	b	X		Figura 4.44
	c	X		Figura 4.45

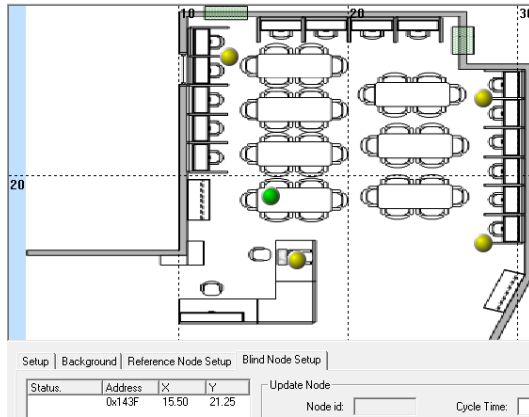
**Tabla 4. 2 Pruebas con cuatro nodos cercanos**



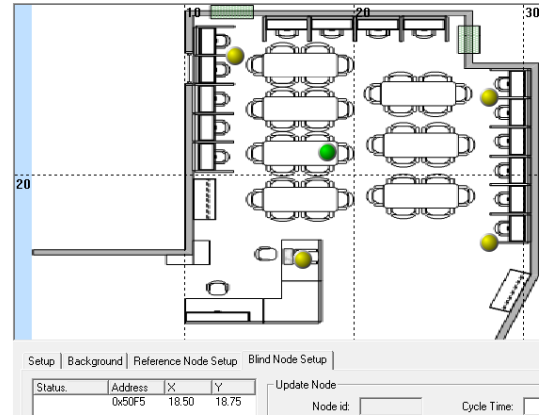
**Figura 4. 24 Ubicación de nodos**



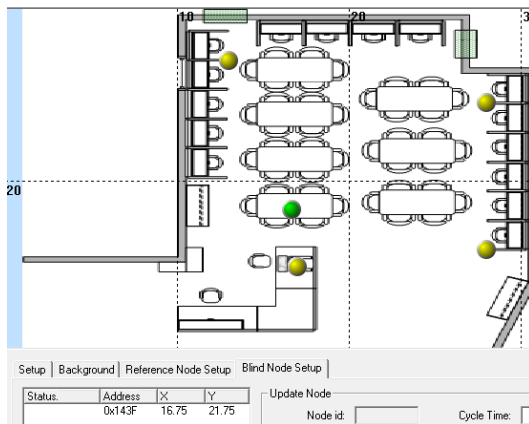
**Figura 4. 25 Prueba #8a**



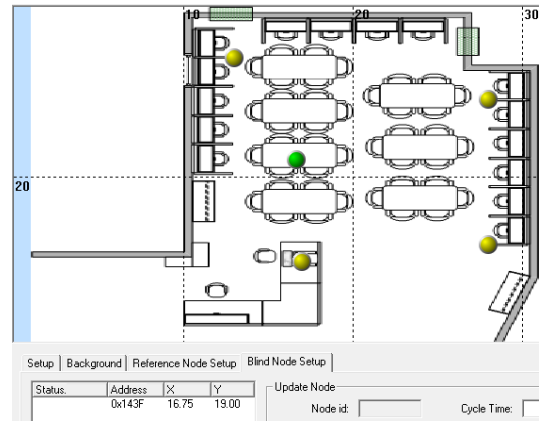
**Figura 4. 26 Prueba #8b**



**Figura 4. 28 Prueba #9a**



**Figura 4. 27 Prueba #8c**



**Figura 4. 29 Prueba #9b**

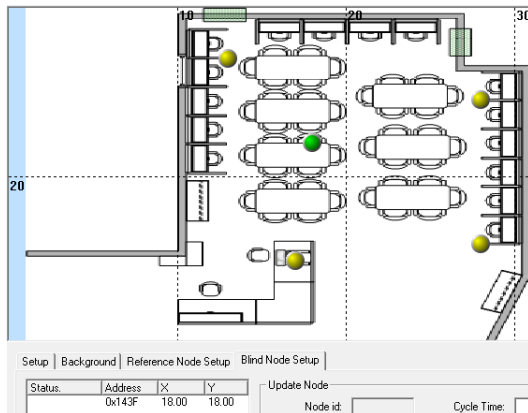


Figura 4. 30 Prueba #9c

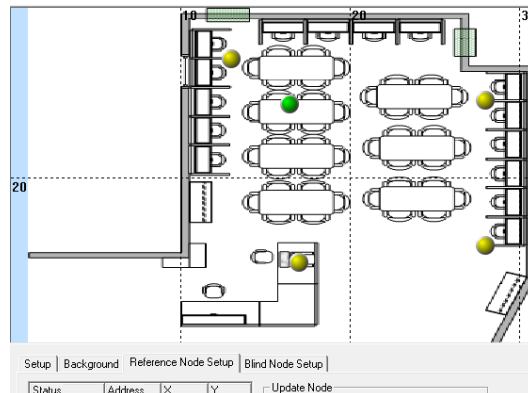


Figura 4. 32 Prueba #10b

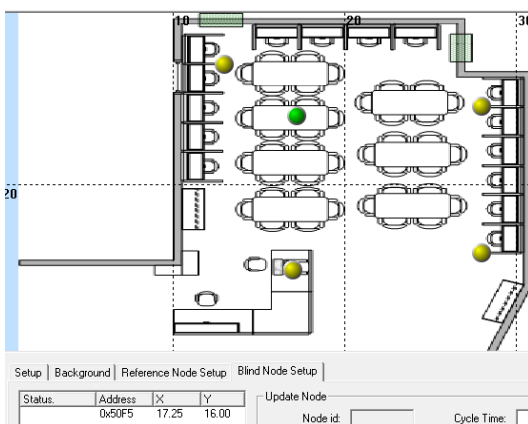


Figura 4. 31 Prueba #10a

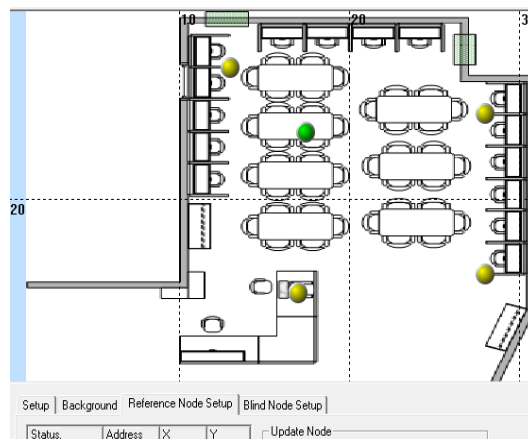


Figura 4. 33 Prueba #10c



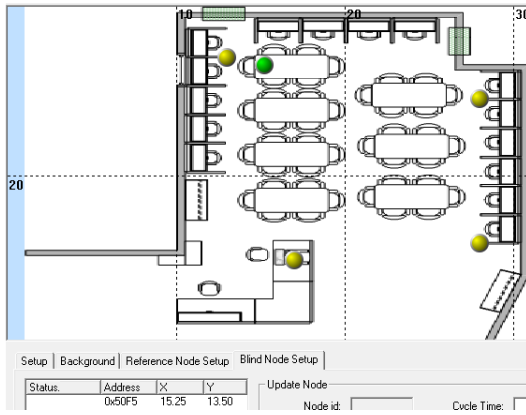


Figura 4. 34 Prueba #11a

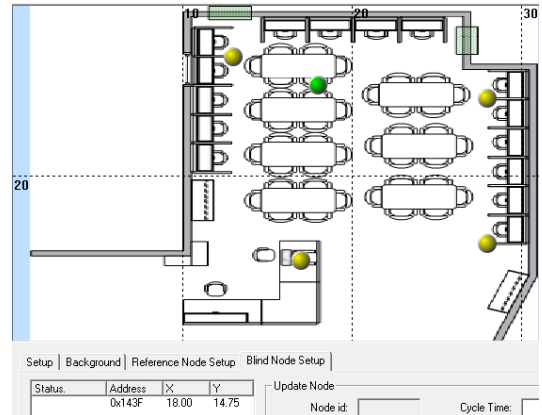


Figura 4. 36 Prueba #11c

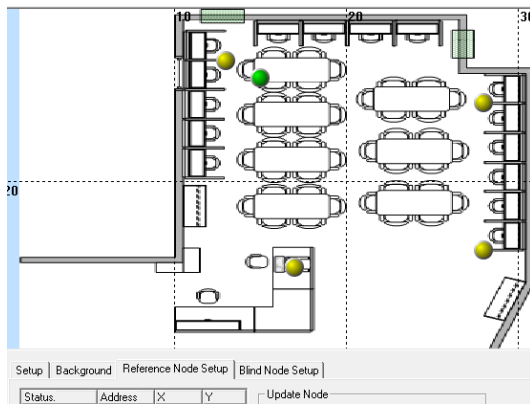


Figura 4. 35 Prueba #11b

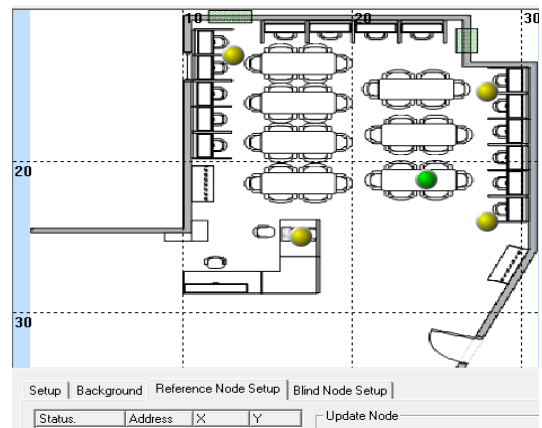
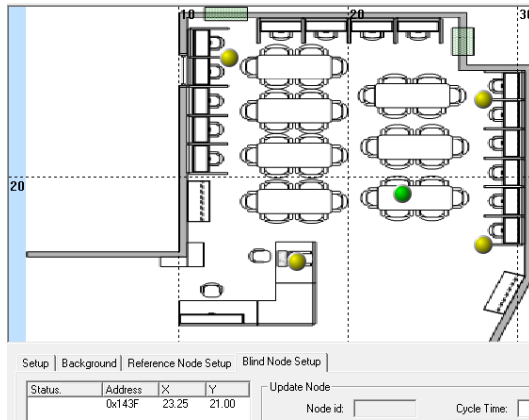
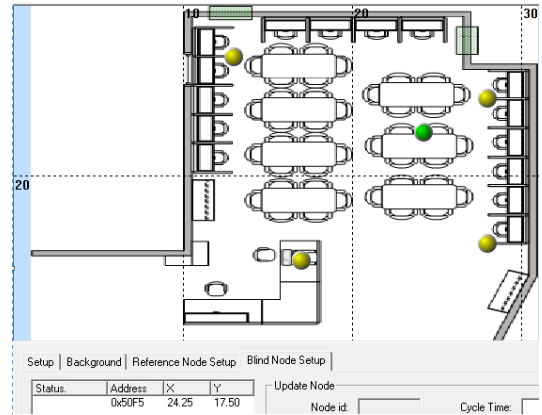


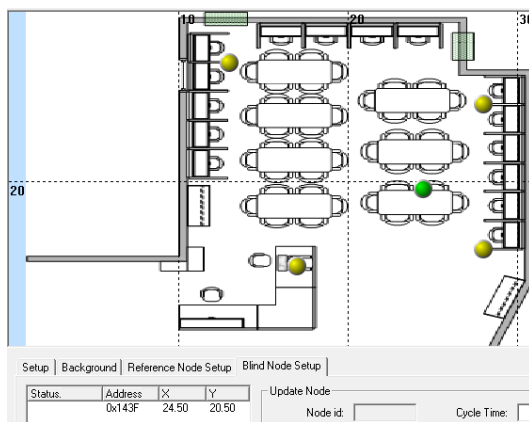
Figura 4. 37 Prueba #12a



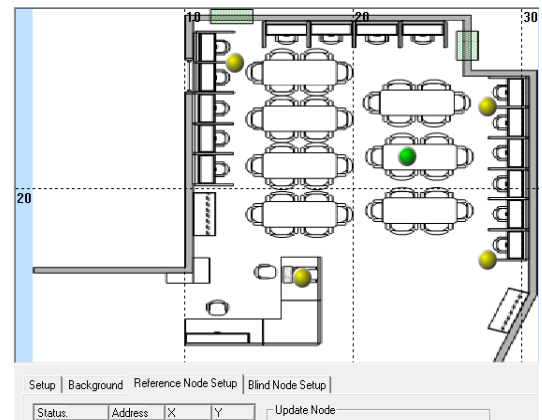
**Figura 4. 38 Prueba #12b**



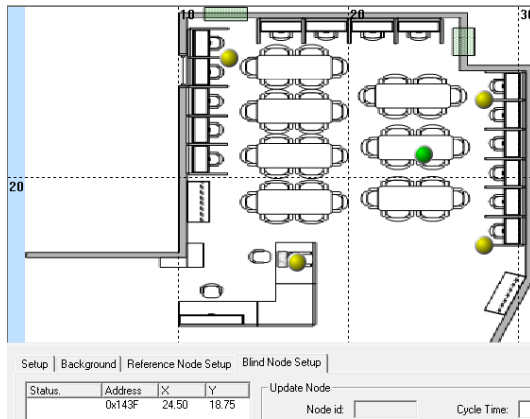
**Figura 4. 40 Prueba #13a**



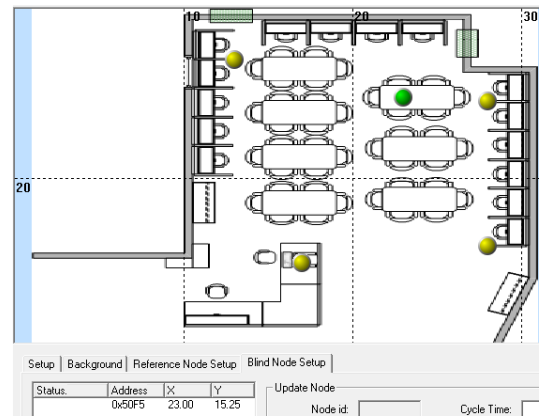
**Figura 4. 39 Prueba #12c**



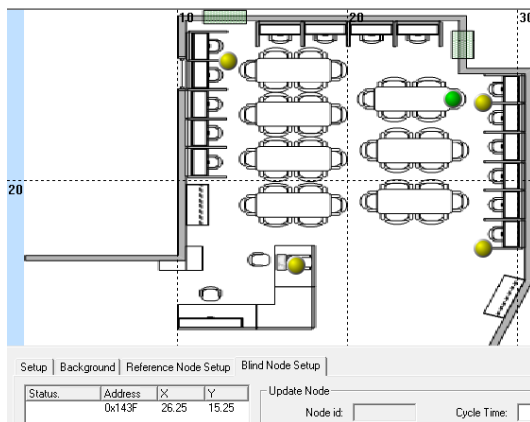
**Figura 4. 41 Prueba #13b**



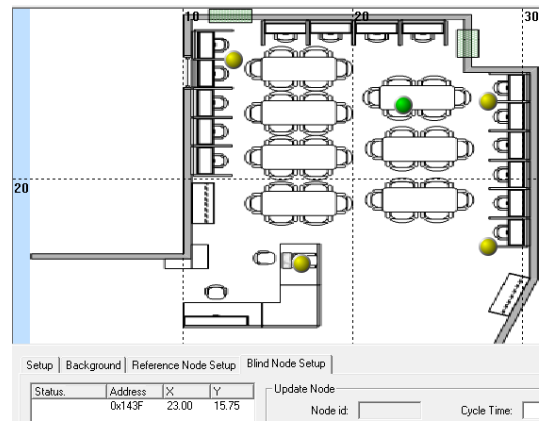
**Figura 4. 42 Prueba #13c**



**Figura 4. 44 Prueba #14a**



**Figura 4. 43 Prueba #14b**



**Figura 4. 45 Prueba #14c**

## 4.2 EFECTIVIDAD DE LOS DATOS OBTENIDOS POR EL SISTEMA

La realización de las pruebas consistía en colocar al nodo móvil en tres de las cuatro esquinas de cada mesa que estaba dentro del área de trabajo.

Se observó, por medio del software Z-Location Engine, si la ubicación del modulo móvil concordaba con la posición actual o si ésta se encontraba en cualquier punto de la mesa y se consideró error aquella ubicación que se encontrase fuera de la mesa en la que se estuviese desarrollando la prueba.

Para determinar la efectividad de los datos se hicieron dos tipos de pruebas. La primera consistía en colocar a uno de los nodos en un punto lejano de los tres restantes mientras que la segunda fue colocar los cuatro nodos lo más cercano posible.

En ambas pruebas se colocó al nodo móvil en las esquinas de cada mesa y se comprobó la veracidad de su ubicación. Los resultados, según el número de intentos, así como sus aciertos y desaciertos, son los que se muestran en la siguiente tabla:

	<b>N° Intentos</b>	<b>N° Aciertos</b>	<b>N° Desaciertos</b>	<b>% Error</b>
<b>Prueba #1</b>	21	18	3	14.29%
<b>Prueba #2</b>	21	20	1	4.76%

**Tabla 4. 3 Eficiencia de las pruebas**

Según estos valores se puede determinar que la confiabilidad que el libro caiga en cualquier punto de las mesas de trabajo se relaciona con la cercanía de los nodos.

Mientras más cercano estén estos nodos, la probabilidad de error será menor. La efectividad del sistema en la prueba 2 es del 95.24% en comparación a la primera prueba, cuya efectividad es del 85.71%, por lo tanto, se considera trabajar bajo los parámetros establecidos para la realización de la segunda prueba.

#### **4.3 ESTIMACIÓN DE LA POTENCIA CONSUMIDA POR EL SISTEMA**

Es importante, en el desarrollo de un proyecto electrónico, realizar un análisis del consumo de potencia, tanto del módulo en general como el de sus componentes, para luego poder determinar el uso de baterías y observar el tiempo de vida que tendrán los módulos. Estos datos, como voltajes y corrientes, se pueden encontrar en las diferentes hojas de datos de sus

fabricantes. A continuación, en los siguientes apartados, se mostrará un breve análisis de los puntos anteriormente mencionados.

#### **4.3.1 CONSUMO DE POTENCIA DE LOS COMPONENTES**

Conforme se dio el desarrollo de las pruebas, también se pudo comprobar el consumo de potencia de los componentes que forman parte de la red ZigBee.

Para la interfaz PC – Módulos, se consideró trabajar con un adaptador AC, cuyo voltaje de salida DC sea de 12V y su corriente sea de 1A a 1.5A.

Para el cálculo de potencia en los nodos fijos, colocados en puntos estratégicos, se decidió previamente, conectarlo a una fuente digital de voltaje y corriente, y se pudo comprobar que, el consumo de potencia de cada nodo es de 270mW.

El procedimiento anterior también fue considerado para el análisis de potencia del nodo móvil, y se observó que su potencia consumida fue de 105mW

### **4.3.2 ESTIMACIÓN DEL TIEMPO DE VIDA DE LOS MÓDULOS**

Antes de la entrega de un producto final, existe siempre la problemática de establecer cuál será su tiempo de vida. Para este proyecto se ha considerado tomar en cuenta factores como el tipo de material de la placa electrónica, elementos a usarse y batería usada como fuente de voltaje.

El FR4 es el material más usado en el desarrollo de placas electrónicas debido a su capacidad para trabajar con frecuencias de hasta 2GHz. El tiempo de vida de este tipo de placa depende bastante de su uso. Si la aplicación requiere de un consumo alto de corriente su tiempo de vida va a ser menor comparado a aquellas cuyo consumo de corriente sea menor. Factores como el ambiente donde se encuentre la placa electrónica también va a influenciar. A continuación, la figura 4.46 muestra el ambiente donde van a instalarse los módulos.

Refiriéndose a la interfaz PC – Módulos, como éste está conectado directamente a un tomacorriente se consideró proteger los reguladores de voltaje y sus respectivos capacitores con diodos para evitar que el exceso de corriente afecte su correcto funcionamiento.

Considerando que el consumo de corriente en este proyecto es bajo (30mA – 35mA) y que el ambiente donde van a estar los módulos es libre

de humedad debido a la presencia del aire acondicionado, se estima que el tiempo de vida de cada modulo sería de 5 a 7 años aproximadamente.



**Figura 4. 46 Área de estudio de la Biblioteca FIEC**

Es importante también tener en cuenta el tipo de baterías que se va usar. El tiempo de vida de las baterías empleadas en este proyecto es de aproximadamente 8 horas en el caso de la batería usada en el módulo móvil y de 34 horas usando baterías de 9V en los módulos fijos, siempre y cuando estos módulos estén siempre en uso.



## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Después de haber realizado las pruebas y haber hecho el análisis de cada una de ellas, se presentan las siguientes conclusiones:

1. En el desarrollo de este proyecto se observó que la cercanía de los nodos influía en la eficiencia del sistema, mientras su separación disminuía también lo hacía su porcentaje de error, por lo tanto, se concluye que la prueba eficiente, en este caso, fue aquella en la que se estableció colocar sus cuatro nodos cercanos, correspondiente a la prueba 2 del proyecto.
2. La posición del nodo móvil que reflejaba el software Z-Location Engine en ciertos casos difería de la posición actual, mostrando a veces una posición fuera del área actual de prueba. Se concluye que, la trilateración entre ondas también influye en la posición, debido a que se realiza de acuerdo a las tres primeras ondas esféricas que se interceptan, sin importar si las ondas son las más cercanas al objeto que se está buscando.

3. La configuración de las direcciones IEEE de los equipos deben estar bien establecidas porque puede haber errores de conflicto en la red si llegase a existir direcciones con igual identificación.
4. Es obligatorio configurar los nodos fijos cerca de la interfaz PC – Módulos debido a que estos envían su información de presencia y de ubicación, receptando la interfaz dicha información. Si no se llega a realizar este importante paso, la interfaz no guardará la información de referencia, dando al final información errónea de la ubicación del módulo en movimiento.

Se presentan las siguientes recomendaciones:

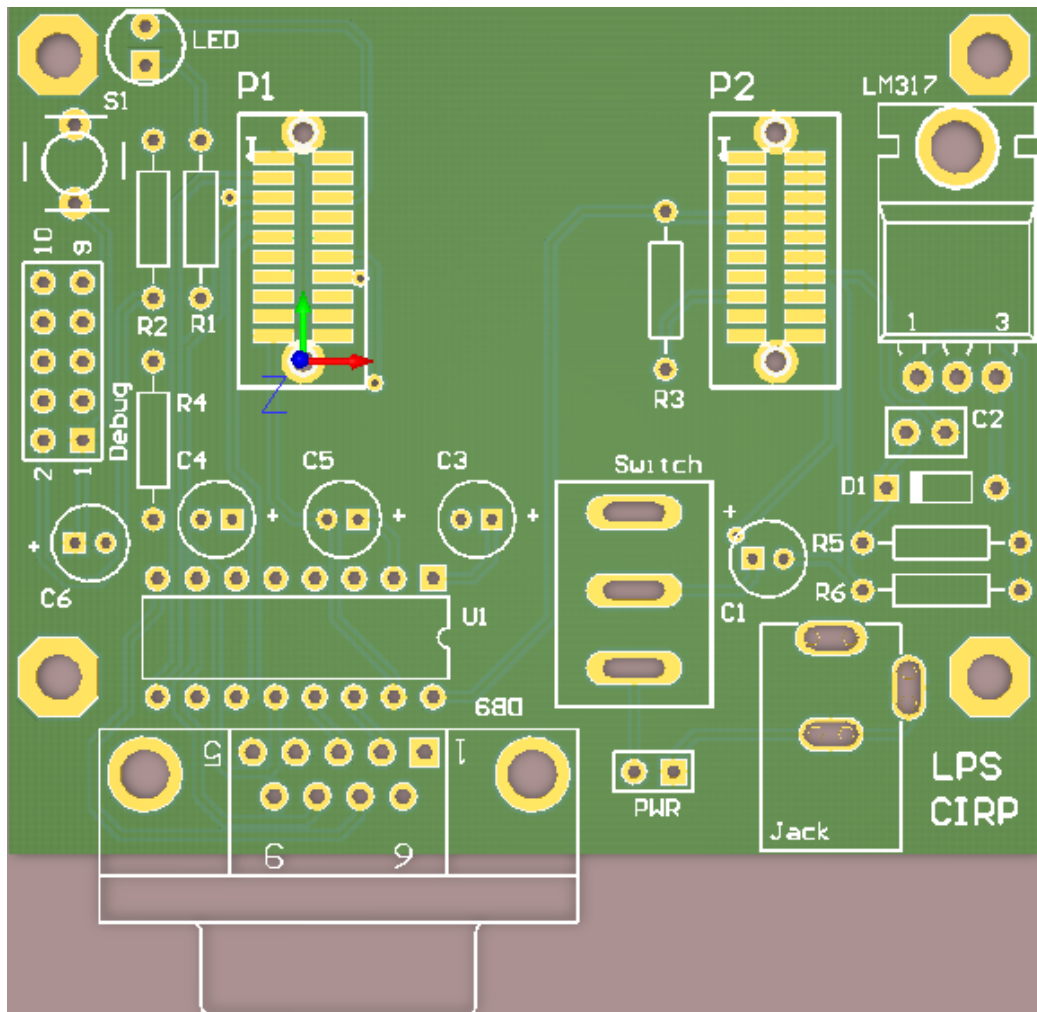
1. Si se desea desarrollar una mejora del proyecto, se recomienda trabajar con mas nodos fijos en la red, para obtener mejor precisión en los resultados ya que, por ser un prototipo se trabajó con el número mínimo de nodos, causando en ciertas ocasiones problemas de localización del objeto.
2. Es recomendable tratar de trabajar en áreas de preferencia cuadradas para que la ubicación de los nodos sea lo más cercano a una línea recta.

3. La correcta elección de la batería influye también en el tiempo de vida. Se recomienda colocar en las nuevas mejoras, una batería que tenga buenas características en cuanto al consumo, de preferencia mayor a 240mAh.
4. Es recomendable también evitar instalar los nodos cerca de equipos que emitan señales de radio frecuencia como dispositivos inalámbricos porque provocan interferencia al momento de la búsqueda del nodo móvil.
5. Se debe evitar colocar los nodos en lugares como pilares, anaqueles o estanterías ya que provocan la reflexión de la señal, provocando también que llegue debilitada a los nodos cercanos en la red.
6. En el caso que se trabajase en un lugar donde hayan bastantes obstrucciones se recomienda comprar una cantidad considerable de nodos y ubicarlos lo más cerca posible, de esa manera se evitaría que la señal de posicionamiento llegue debilitada a los nodos fijos. Es también posible usar otro tipo de tecnología que no represente un problema con respecto a obstrucciones arquitectónicas, un ejemplo de esta tecnología es Wi-Fi.

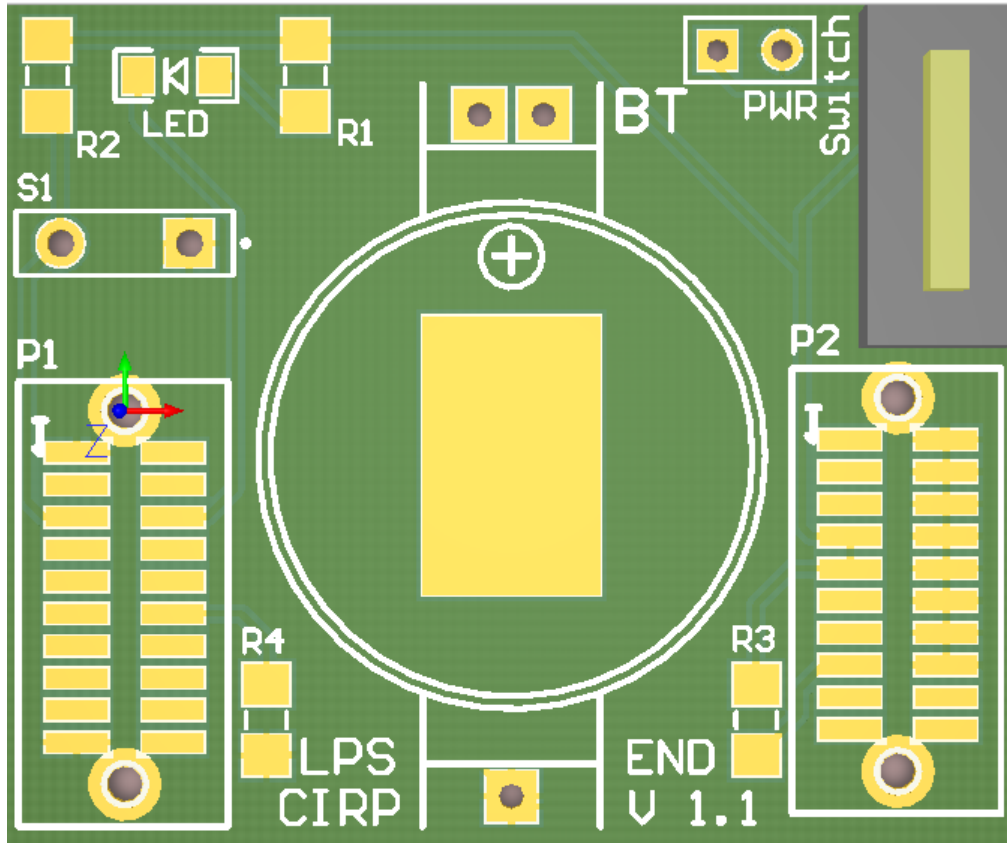
# ANEXOS

## ANEXO A

### Diseño PCB de los módulos



Diseño PCB de Interfaz PC y nodos fijos



Diseño PCB de la base del nodo móvil

## BIBLIOGRAFÍA

1. Kolodziej Krzysztof – Hjelm Johan, Local Positioning Systems: LBS applications and services, CRC Pre, EEUU, 2006
2. Huidobro – Millán – Roldan, Tecnologías de Telecomunicaciones, Alfaomega, México, 2008
3. Roldán David, Comunicaciones Inalámbricas, Alfaomega, México, 2005
4. Shen – Guizani – Qiu – Le-Ngoc, Ultra-wideband wireless communications and networks, Wiley, Great Britain, 2006
5. Lehpamer Harvey, RFID Design Principles, ARTEC HOUSE INC, EEUU, 2008
6. Farahani Shahin, ZigBee Wireless Networks and Transceivers, Wiley, EEUU, 2008
7. Ekahau, Comparison of Wireless Indoor Positioning Technologies.
8. ZigBee Alliance, ZigBee Specification, [www.zigbee.com](http://www.zigbee.com), 2005
9. Texas Instruments, AN058, [www.ti.com](http://www.ti.com), Abril 2010
10. Chipcon Products from Texas Instruments, CC2431 System-on-Chip for 2.4GHz ZigBee/IEEE 802.15.4 with Location Engine, [www.ti.com](http://www.ti.com), 2009
11. Chipcon Products from Texas Instruments, cc2430 A True System-on-Chip solution for 2.4GHz IEEE 802.15.4/ZigBee, [www.ti.com](http://www.ti.com), 2009

12. Chipcon Products from Texas Instruments, Application Note AN042,  
[www.ti.com](http://www.ti.com), Abril 2010
13. Chipcon Products from Texas Instruments, Location Engine Demo Guide,  
[www.ti.com](http://www.ti.com), Abril 2010
14. Chipcon Products from Texas Instruments, CC2431 Development kit 1.3.,  
[www.ti.com](http://www.ti.com), Abril 2010