

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA



**“CARACTERIZACIÓN DE ENTORNOS DE PROPAGACIÓN
UTILIZANDO TECNOLOGÍA IEEE 802.15.4”**

T E S I S

Que presenta para obtener el grado de MAESTRO EN CIENCIAS

JESÚS GUILLERMO SERVÍN AGUILAR

**DIRECTOR DE TESIS:
DR. ÁNGE GABRIEL ANDRADE REÁTIGA**

Mexicali, Baja California; México. Agosto de 2010

RESUMEN de la Tesis de JESÚS GUILLERMO SERVÍN AGUILAR, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS. Mexicali, Baja California, México. Agosto de 2010.

**“CARACTERIZACIÓN DE ENTORNOS DE PROPAGACIÓN UTILIZANDO
TECNOLOGÍA IEEE 802.15.4”**

Resumen aprobado por:

Dr. Ángel Gabriel Andrade Reátiga
Director de tesis

En este trabajo de tesis se presentan mediciones con el estándar de comunicación IEEE 802.15.4, realizando una caracterización de canal en entornos de propagación interiores y exteriores, teniendo un especial interés en los diferentes desvanecimientos e interferencias existentes en el canal de comunicación considerando las características físicas existentes en los ambientes donde se realizaron las mediciones considerando la Universidad Autónoma de Baja California en la ciudad de Mexicali, Baja California, como el escenario de las mediciones.

En este trabajo de investigación se consideran dos métricas, la primera de ellas es la pérdida por trayectoria (RSSI) y segunda es la tasa de pérdidas por paquetes (PER). Estas métricas se obtienen en cada uno de los escenarios de medición, obteniendo la calidad del enlace y posteriormente poder garantizar que la comunicación en el lugar es satisfactoria. Finalmente se utiliza un modelado de canal, diseñado anteriormente por otros autores, con el cual se ajustan los resultados obtenidos con las mediciones en cada escenario y con esto poder utilizar el modelado de canal en cualquier entorno de propagación de la Universidad Autónoma de Baja California en la ciudad de Mexicali, Baja California.

Palabras clave: IEEE 802.15.4, Caracterización de canal, RSSI, PER.

ABSTRACT of the thesis from JESÚS GUILLERMO SERVÍN AGUILAR, presented as partial requirement, for the obtaining the title of MASTER IN SCIENCES. Mexicali, Baja California, México. August of 2010.

**“PROPAGATION ENVIRONMENTS CHARACTERIZATION USING IEEE
802.15.4 TECHNOLOGY”**

Abstract approved by:

Dr. Ángel Gabriel Andrade Reátiga
Thesis Advisor

This work presents measurements with the standard IEEE 802.15.4, we did a radio channel characterization in indoor and outdoor environments, we had a special interest in different fading's and interferences that exist in the communication channel considering the physical characteristics that exists in the environment where the measurements were done taking the Universidad Autónoma de Baja California in the city of Mexicali, Baja California, like the scenario of the measurements.

In this investigation work we considered two metrics, the first of them is Receive Signal Strength Indicator (RSSI) and the second is Packet Error Rate (PER). These measurements were obtaining on each of the scenarios of measurement and guarantee a good link quality in the communication in those environments. Finally a radio channel modeling was use, design from previous authors, with which the results were fix with the measurements in each scenario and with this use the channel modeling in the different environments in the Universidad Autónoma de Baja California in the city of Mexicali, Baja California.

Key words: IEEE 802.15.4, Radio channel characterization, RSSI, PER.

DEDICATORIA

A mi novia, *Mónica del Carmen Hernández López*, por estar siempre conmigo apoyándome en todo momento y alentándome a continuar en todo momento.

A mis padres, *J. Jesús Servín Gómez* y *Mercedes Aurora Aguilar Kaiten*, por velar por mis necesidades, ser mi ejemplo a seguir en la vida y por el amor que me han dado.

A mis hermanas, *Mercedes Gabriela*, *Fernanda Paola*, *Fátima Bernardett* y *Mariana Guadalupe*, por las palabras brindadas en todo momento, además de su apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTOS

A DIOS nuestro señor, por darme la oportunidad de estudiar esta maestría, guiarme en cada paso de mi vida e iluminarme en mis decisiones.

A mi asesor Dr. *Ángel Gabriel Andrade Reátiga* por guiarme, asesorarme y apoyarme en el tema de investigación que he realizado.

A los miembros de mi comité de tesis, *Dr. Roberto Conte Galván, M.C. Marco Aurelio Turrubiarres Reynaga, M.I. Victor Alonso Parra Pacheco*, por su tiempo, apoyo y comentarios para mejorar mi trabajo de investigación.

A mis abuelos, tíos y primos, los cuales me alentaron a seguir, brindándome su apoyo y confianza en mi etapa de estudiante de Maestría.

A mis compañeros de la Universidad por compartir experiencias, comentarios, ideas y ayuda en mi proceso de investigación.

A la Universidad Autónoma de Baja California, por abrirme sus puertas para poder seguir con mi preparación académica.

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

Índice General

	<u>Página</u>
Resumen.....	I
Abstract.....	II
Dedicatorias.....	III
Agradecimientos.....	IV
Índice de figuras.....	VIII
Índice de tablas.....	X

Capítulo	<u>Página</u>
1. Introducción.....	1
1.1 Marco de referencia.....	2
1.2 Planteamiento del problema.....	4
1.3 Trabajo relacionado.....	6
1.4 Objetivo general.....	9
1.5 Metas de la tesis.....	9
1.6 Organización de la tesis.....	9
2. Modelados de propagación para ambientes microcelulares y picocelulares..	11
2.1 Conceptos básicos en propagación.....	11
2.2 Clasificación de los modelos de propagación.....	19
2.3 Modelos de propagación para interiores.....	21
2.3.1 Modelo empírico ITU-R.....	23
2.3.2 Modelo Cost-231 Multi-Pared.....	24
2.3.3 Modelos determinísticos.....	25
2.3.4 Modelo Trazado de rayos (Ray Tracing).....	25

2.3.5	Modelo Fine-Difference Time Domain (FDTD).....	28
2.3.6	Modelo basado en redes neuronales (ANN; Artificial Neural Networks).....	29
2.3.7	Modelo Saleh-Valenzuela.....	30
2.4	Efectos del sombreado en interiores.....	32
2.5	Conclusiones.....	34
3.	Características y operación básica de ZigBee.....	35
3.1	Introducción.....	35
3.2	Características técnicas de ZigBee.....	37
3.2.1	Estructura del estándar IEEE 802.15.4	38
3.2.2	Tipos de dispositivos.....	40
3.3	Características de la capa Física IEEE 802.15.4.....	41
3.4	Capa de enlace de datos.....	43
3.4.1	Empaquetamiento y direccionamiento.....	44
3.4.2	Acceso al canal.....	47
3.5	Topologías de red.....	48
3.6	Áreas de aplicación.....	50
3.7	Conclusiones.....	51
4.	Experimentos.....	52
4.1	Características principales.....	52
4.2	Caracterización espacial.....	53
4.2.1	Entornos interiores.....	54
4.2.2	Entornos exteriores.....	57
4.3	Caracterización temporal.....	62
5.	Resultados.....	65

5.1 Características principales.....	65
5.2 Caracterización espacial.....	66
5.2.1 Entornos interiores.....	66
5.2.2 Entornos exteriores.....	70
5.3 Caracterización temporal.....	80
5.4 Modelado de canal Ray-Tracing.....	88
6. Conclusiones.....	93
Referencias.....	94

Índice de figuras

1. Magnitud de los coeficientes de reflexión y transmisión para tierra seca @2 GHz.....	14
2. Magnitud de los coeficientes de reflexión y transmisión para tierra húmeda @2 Ghz.....	15
3. Magnitud de los coeficientes de reflexión y transmisión para una pared de ladrillo @2 Ghz.....	15
4. Coeficientes de Reflexión y Transmisión generalizados en función de la frecuencia para un ángulo de incidencia de 10° , $\epsilon=2.5\epsilon_0$, $\sigma=0.01$ y grosor de la pared=10 cm....	18
5. Coeficientes de Reflexión y Transmisión generalizados en función del grosor de la pared para un ángulo de incidencia de 10° , $\epsilon=2.5\epsilon_0$, $\sigma=0.01$ y frecuencia= 2 GHz....	19
6. Representación geométrica del modelo Ray-Tracing.....	26
7. Representación de las señales multitrayectorias en clúster.....	31
8. Representación de la llegada de las multitrayectorias.....	32
9. Modelo de referencia del estándar ZigBee.....	39
10. Estructura de los canales ZigBee.....	43
11. Formato de la trama de datos.....	45
12. Formato de trama ACK.....	45
13. Formato de trama MAC.....	46
14. Formato de trama Baliza.....	46
15. Formato general de la estructura de súper trama.....	47
16. Tipos de topología de una red ZigBee.....	50
17. Acomodo de los dispositivos en las mesas.....	52
18. Acomodo de los dispositivos en el entorno ideal con LOS.....	54
19. Acomodo de los dispositivos en una casa-habitación con LOS.....	56
20. Acomodo de los dispositivos en la cochera de una casa-habitación.....	57
21. Acomodo de los dispositivos en la explanada de la Universidad Autónoma de Baja California campus de ingeniería en Mexicali, experimento de distancia con LOS.....	58
22. Acomodo de los dispositivos en la explanada de la facultad de ingeniería campus Mexicali, experimento de distancia con LOS.....	58
23. Acomodo de los dispositivos en la explanada de la facultad de ingeniería campus Mexicali, experimento de distancia con NLOS.....	59
24. Acomodo de los dispositivos en la explanada de la facultad de ingeniería campus Mexicali, experimento de patrón de radiación con LOS.....	60
25. Acomodo de los dispositivos en la explanada de la facultad de ingeniería campus Mexicali, experimento de patrón de radiación extendido con LOS.....	61
26. Acomodo de los dispositivos en la explanada de la facultad de ingeniería campus Mexicali, experimento de patrón de radiación extendido con NLOS.....	61
27. Acomodo de los dispositivos en la caracterización temporal usando un entorno interior de casa-habitación con LOS.....	62

28.	Acomodo de los dispositivos en la caracterización temporal usando un entorno interior de casa-habitación con LOS.....	63
29.	Valores de RSSI y PER en la Jaula de Faraday.....	66
30.	Promedio de valores de RSSI y PER en la Jaula de Faraday.....	67
31.	Valores de RSSI y PER en la casa-habitación.....	68
32.	Valores de RSSI y PER explanada UABC campus Mexicali.....	71
33.	Comparación de RSSI y PER explanada UABC y Facultad de Ingeniería campus Mexicali.....	73
34.	Valor de RSSI y PER patrón de radiación.....	75
35.	Patrón de radiación de la Facultad de Ingeniería.....	77
36.	A. Valores de RSSI y PER área de cobertura con LOS B. Valores de RSSI y PER área de cobertura NLOS.....	78
37.	Valores de RSSI y PER caracterización temporal.....	81
38.	Comparación de valores de RSSI de los canales 2,6 y 12.....	84
39.	Comparación de valores de PER de los canales 2,6 y 12.....	85
40.	Comparación de valores de RSSI y PER en el canal 2.....	87
41.	Ejemplo modelo Ray Tracing de 10 rayos.....	89
42.	Modelo Ray Tracing de dos rayos.....	90
43.	Resultados del modelo Ray Tracing de diez rayos.....	92

Índice de tablas

1. Valores típicos para el factor de penetración en edificios $L_f(n_f)$	24
2. Valores recomendados para modelo COST231 Multi pared.....	25
3. Propiedades Físicas del estándar IEEE 802.15.4.....	42
4. Frecuencias de los canales de operación de ZigBee.....	63
5. Correlación entre RSSI y PER en la casa-habitación.....	69
6. Correlación entre RSSI y PER en la Facultad de Ingeniería experimento de patrón de radiación.....	76
7. Correlación entre RSSI y PER en la Facultad de Ingeniería área de cobertura....	79
8. Frecuencias de los canales de operación de ZigBee.....	81
9. Correlación entre RSSI y PER caracterización Temporal.....	83
10. Comparación de valores de RSSI y PER de los canales 2, 6 y 12.....	86
11. Comparación de valores de RSSI y PER del canal 2.....	87

Capítulo 1

Introducción

Ha pasado más de un siglo desde que se realizó la primera transmisión vía radio, y a lo largo de este tiempo las comunicaciones inalámbricas han sufrido una notable evolución. Todas las mejoras introducidas en estos sistemas tienen un denominador común, el afán de transmitir mayor cantidad de información, lo más lejos posible, y/o con la mejor calidad posible.

La era de la información y las comunicaciones multimedia actual demanda altas velocidades de transmisión y mayor calidad de las comunicaciones. En este sentido, se han realizado avances en las técnicas de modulación, codificación y en el procesado de señales que permiten maximizar la eficiencia espectral. Sin embargo, esta eficiencia espectral está limitada por la capacidad de Shannon (eficiencia espectral máxima). Este factor unido al hecho de que el espectro radio eléctrico es un recurso limitado con anchos de banda asignados finitos y reducidos supone un límite a la velocidad máxima de transmisión. Además de esta limitación, el canal radio es un medio hostil que degrada la calidad de las comunicaciones. Y, conforme aumenta la cantidad de información a transmitir, es necesario investigar las características e influencia de los entornos de propagación en la calidad de la transmisión. De esta forma, los diseñadores de sistemas inalámbricos puedan, aprovechando el conocimiento de las características del canal, maximizar el uso del ancho de banda disponible y planificar con mayor detalle la ubicación y la cantidad de transmisores de la red.

Existe gran variabilidad de las señales por los efectos de los fenómenos físicos y aleatorios que se encuentran en el ambiente y la región donde se desea implementar la red, por tal motivo es necesario desarrollar y aplicar modelos que permitan predecir el comportamiento de los niveles de potencia de la señal de acuerdo a las condiciones del entorno. Caracterizar de forma experimental un entorno de propagación consiste en verificar los elementos y factores que afectan los niveles de potencia de la señal entre el

transmisor y el receptor. Con esta caracterización es posible desarrollar un modelo de propagación sencillo que, basado en la información de las mediciones experimentales, permita predecir con el mínimo error, el comportamiento del canal de comunicación dependiendo de las características físicas del medio donde se aplica el modelo.

Por lo anterior, el propósito de esta Tesis es contribuir al conocimiento de las características de propagación en entornos exteriores e interiores utilizando tecnología WPAN (Wireless Personal Area Networks).

1.1 Marco de referencia

Las redes inalámbricas de área personal WPAN por sus siglas en inglés Wireless Personal Area Networks son redes que comúnmente cubren distancias del orden de los 10 metros, normalmente utilizadas para conectar varios dispositivos portátiles personales sin la necesidad de utilizar cables [1]. Ésta comunicación de dispositivos peer-to-peer normalmente no requiere de velocidades altas de transmisión de datos. Las pequeñas áreas de cobertura y las bajas velocidades de datos tienen como resultado un bajo consumo de energía logrando que la tecnología WPAN sea adecuada para utilizarse en dispositivos móviles que funcionan con baterías, tales como teléfonos celulares, asistentes personales PDA o cámaras digitales. A diferencia de las redes de área local (WLAN), una conexión hecha a través de una WPAN involucra muy poca o nula infraestructura o conexiones directas hacia el mundo exterior. Éste tipo de tecnología también procura hacer un uso eficiente de los recursos, por lo que se han diseñado protocolos simples y óptimos para cada necesidad de comunicación y aplicación.

La tecnología WPAN principal, es la tecnología Bluetooth. Desarrollada por Ericsson en 1994, ofrece una velocidad máxima de 1 Mbps con un alcance máximo de unos treinta metros. La tecnología Bluetooth, también conocida como IEEE 802.15.1, tiene la ventaja de tener un bajo consumo de energía, resulta ideal para usarla en periféricos de tamaño pequeño. Otra tecnología WPAN es la HomeRF (Home Radio Frequency), lanzada en 1998 por HomeRF Working Group (que incluye a los fabricantes Compaq, HP, Intel, Siemens, Motorola y Microsoft, entre otros), ofrece una velocidad máxima de 10 Mbps con un alcance de 50 a 100 metros sin amplificador. A pesar de estar respaldado por Intel, el

estándar HomeRF se abandonó en enero de 2003, en gran medida porque los fabricantes de procesadores empezaron a usar la tecnología Wi-Fi en placa (por medio de la tecnología Centrino, que incluía un microprocesador y un adaptador Wi-Fi en un solo componente).

La tecnología Zigbee (conocida como IEEE 802.15.4), al igual que Bluetooth, también se puede utilizar para conectar dispositivos en forma inalámbrica a un costo muy bajo y con bajo consumo de energía. Resulta particularmente adecuada porque se integra directamente en pequeños aparatos electrónicos (como, por ejemplo, electrodomésticos, sistemas estéreos y juguetes). Zigbee funciona en la banda de frecuencia de 2.4 GHz, y puede ofrecer una velocidad de transferencia de hasta 250 Kbps con un alcance máximo de unos 100 metros [2]. La tecnología Ultra Banda Ancha (UWB, IEEE 802.15.3), considerada la tecnología WPAN del futuro, alcanza velocidades de hasta 400 Mbps con una cobertura 10 metros como máximo aproximadamente [11]. A diferencia de los sistemas inalámbricos convencionales, que utilizan una portadora para transmitir su información, los sistemas UWB transmiten la información utilizando pulsos de muy corta duración (del orden de los nanosegundos), lo que provoca que la energía de la señal se extienda desde niveles de DC hasta unos cuantos gigahertz sin utilizar una frecuencia portadora. Esta técnica (basada en no utilizar portadora) permite reducir complejidad y costo en el transmisor-receptor

En general el estándar IEEE 802.15 se diseñó y desarrolló para utilizarlo en una amplia gama de aplicaciones, entre las cuales se incluyen; detección y localización de personas en zonas de desastres; monitoreo de la presión neumática en las llantas y en la agricultura para medir el nivel de humedad en el suelo, pesticida, herbicida o niveles de pH. También puede utilizarse para control industrial, recolectar datos médicos, ejercer labores de detección de humo o de intrusos. Sin embargo, las mayores oportunidades de desarrollo del IEEE 802.15 están en la automatización del hogar.

1.2 Planteamiento del Problema

Debido al desarrollo de nuevas aplicaciones y tecnologías inalámbricas, los usuarios exigen equipos de transmisión cada vez más pequeños por razones de portabilidad y ligereza de peso, y dotados a su vez de mayor autonomía. Ambas características son posibles si se utilizan terminales de baja potencia y, consecuentemente de corto alcance como los utilizados por las redes WPAN. Por lo anterior es indispensable disminuir el tamaño de las células y tan pequeñas pueden llegar a ser dicha células, que es posible que abarquen, no solo el interior de un edificio, sino tan solo una porción de él, como un pasillo o incluso una sola habitación. Con esto, aparecen conceptos como picocélula, e incluso femtocélula [10], para comunicaciones móviles en interiores. El hecho, de que ambos terminales se encuentren en el interior de un edificio, hospital o casa supone que el tratamiento necesario para la caracterización del canal presente ciertas características muy particulares. Conocer el comportamiento de las señales en un entorno de propagación determinado permitirá desarrollar protocolos de comunicación más eficientes en su funcionamiento, así como determinar la ubicación adecuada de los nodos transmisores que garanticen calidad en la comunicación y con esto, incrementar el tiempo de vida de cada nodo y la calidad en el servicio [4].

Como se mencionó en la sección anterior, las tecnologías IEEE 802.15 operan en la banda de frecuencia libre ISM (Industrial, Científica y Médica) prácticamente a una frecuencia de 2.4 Ghz. Debido a que son tecnologías las cuales trabajan con transmisores de baja potencia, presentan mayor susceptibilidad al ruido, interferencias y desvanecimientos [6]. Teniendo en cuenta estas limitaciones, las redes WPAN no pueden garantizar una comunicación libre de errores, por lo que hace indispensable realizar una caracterización del entorno de propagación para su despliegue. En trabajos como [5] y [6], se concluyó que las estructuras de los edificios, además de la interferencia ocasionada por otras tecnologías inalámbricas que operan en la misma banda de frecuencia; son las causas principales de que las redes WPAN generen errores en la comunicación.

La señal emitida por una antena (emisor) experimenta múltiples transformaciones en su señal a lo largo de su trayectoria por el medio de propagación, llegando al receptor solo una pequeña parte de la señal total transmitida. El camino que sigue la señal entre receptor y

emisor puede variar en múltiples formas debido a la existencia de diferentes obstáculos, (paredes, techos, suelos, incluso personas). Al situarse en el trayecto de propagación de la señal, actuarán como elementos dispersores o scatterers y producirán que las señales transmitidas sufran fenómenos de difracción, reflexión y dispersión [1]. Esto hace difícil predecir la señal recibida en un determinado punto o analizar el canal de radio. Los modelos de propagación se han enfocado tradicionalmente en predecir la potencia promedio de la señal recibida; así como la variación de la potencia en la proximidad espacial de un lugar en particular. En la antena receptora o transmisora, se recibirán múltiples señales que habrán sufrido procesos de reflexión y difracción diferentes. Debido a la diferencia de caminos recorridos, estos ecos o réplicas de la señal transmitida llegarán con ángulos de incidencia, atenuación, desfases y retardos de propagación diferentes. Este fenómeno es conocido como efecto multitrayectoria. La contribución de estas múltiples replicas recibidas en determinados instantes puede ser constructiva en unos casos, o destructiva en otros, en función de las amplitudes y desfases que posean dichas réplicas. Esto provoca que la potencia de la señal recibida no sea constante, sino que varíe con el tiempo produciéndose desvanecimientos.

Un modelo de propagación es un conjunto de expresiones matemáticas, diagramas y algoritmos los cuales se utilizan para representar las características de un canal radio de comunicación de un entorno de propagación determinado. Generalmente los modelos de predicción se pueden clasificar en empíricos o estadísticos, teóricos o determinísticos o una combinación de estos dos (semi-empíricos). Mientras que los modelos empíricos se basan en mediciones, los modelos teóricos se basan en los principios fundamentales de los fenómenos de propagación de ondas de radio; sin embargo, la principal desventaja de estos modelos es que requieren de una gran base de datos con las características del lugar, las cuales en ocasiones son prácticamente imposibles de conseguir. En general, los modelos de propagación predicen la pérdida por trayectoria que una señal inalámbrica pueda tener entre transmisor y un receptor móvil o fijo. La ventaja de modelar canales de radio teniendo en cuenta las características de la trayectoria entre transmisor y receptor, es conocer la viabilidad de los proyectos que se deseen planear en determinados sectores, de esta manera se podrá hacer una estimación acerca de la necesidad, costos y capacidad de los equipos requeridos [1].

La mayoría de los modelos de cobertura de redes inalámbricas existentes son modelos de caja negra, en los que solo es necesario ajustar ciertos parámetros del modelo para obtener los resultados deseados. Sin embargo, todos estos modelados asumen un patrón de radiación de las antenas simétrico, cuando en la práctica es asimétrico [2],[3]. Por lo tanto, al realizar una caracterización de canal, es posible determinar con exactitud, áreas de cobertura e identificar zonas afectadas por los desvanecimientos de forma negativa, llamadas zonas grises.

1.3 Trabajo relacionado

Con respecto al tema de caracterización de entornos de propagación utilizando tecnología WPAN, existen diversos trabajos donde se presentan metodologías para caracterizar experimentalmente las condiciones del canal de comunicación.

Por ejemplo, en [7], los autores presentan resultados de la caracterización de canal en una industria maquiladora utilizando tecnología “*ZigBee*”. La idea básica del proyecto consistió en evaluar la viabilidad de instalar tecnología Zigbee para el control y monitoreo de las maquinas que se encuentran dentro de la fábrica. La evaluación experimental se realizó en un almacén de 16 x 10.5 metros de la Universidad de Clernson, en Carolina del Sur, Estados Unidos. Se realizaron dos experimentos, el primero permitió capturar las propiedades espaciales del canal radio y el segundo estudiar la calidad del enlace mediante el análisis de la variación temporal del canal. En cada experimento se enviaron 2000 paquetes de 94 bytes de longitud a una potencia de transmisión de -5 dBm y a una frecuencia de operación de 2.4 Ghz. Las métricas utilizadas fueron el RSSI (Received Signal Strength Indicator) y el PER (Packet Error Rate). De los resultados presentados, se determinaron las áreas de cobertura de los dispositivos de prueba y se localizaron las zonas grises; es decir las zonas donde se presentan desvanecimientos profundos y por tanto la comunicación se pierde en dichas zonas. También se concluyó que uno de los factores que, en mayor proporción, afectan considerablemente la calidad de la comunicación son las altas temperatura generadas por las máquinas del lugar.

En [8], se desarrolló un modelo de canal radio que caracteriza el interior de un avión al utilizar una red de sensores. La idea principal de hacer esta evaluación radica en que un futuro se sustituirá el cableado interno del avión por enlaces inalámbricos. Por ejemplo, el cableado que se utiliza para llamar a los sobrecargos o para enviar los avisos de abrocharse el cinturón. Para el desarrollo del modelo, se obtuvo experimentalmente el “*Power Delay Profile*” de la señal transmitida, por medio de la respuesta al impulso en el dominio del tiempo. El modelo teórico está basado en la técnica de Trazado de Rayos (Raytracing), mediante un muestreo estocástico utilizando un método de Montecarlo es posible obtener un diseño de la ubicación de los nodos en la red, también permite evaluar el consumo de baterías y el desempeño de la red.

Determinar el efecto que tiene el cuerpo humano en una comunicación inalámbrica utilizando ZigBee se presenta en [9]. La evaluación se realizó en tres escenarios distintos; dos en exteriores, particularmente en un campo de fútbol y en una calle común, y uno en interiores. En los tres experimentos se colocó en el cuello de dos persona un transmisor/receptor que operaba a una frecuencia de 2.4 Ghz con una potencia de transmisión de 0 dBm. La idea básica del experimento es realizar una caracterización de los distintos entornos de propagación considerando la movilidad de los dispositivos, la afluencia normal de personas y para el caso de interiores, se consideraron los objetos que normalmente se utilizan en una oficina como plantas, escritorios, sillas, computadoras, entre otros. De las conclusiones presentadas en el trabajo se pueden destacar que; (i) las personas no tienen un impacto significativo en la degradación de la señal, (ii) se presentó mayor cantidad perdidas de paquetes en entornos interiores que en exteriores y, (iii) la movilidad de los dispositivos no es un factor determinante en la calidad y desempeño de la red.

En [12], los autores desarrollan un *testbed* experimental inalámbrico para estudiar las propiedades y comportamiento de una red inalámbrica en el hogar. El experimento consistió en instalar 6 redes inalámbricas WLAN, que operan bajo el estándar 802.11, en seis casas distintas ubicadas en Estados Unidos y en Inglaterra. Se evaluó la calidad de los enlaces de la red inalámbrica instalada en los hogares, tomando en cuenta; la velocidad de transmisión, la potencia de transmisión, la ubicación de los nodos, el material de

construcción de las casas y la interferencia externa. En el trabajo se establece que, con evidencia empírica, a pesar de que los hogares son de área pequeña, presentaron un entorno de propagación demasiado hostil por lo que no se garantizó una conectividad ubicua en toda la casa. Los resultados también demuestran que los enlaces dentro de las casas son muy estables la mayor parte del tiempo, sin embargo presentan características muy marcadas de asimetría y comportamientos distintos entre un enlace y otro adyacente. Uno de los factores que determinó que se tuvieran condiciones de comunicación aceptables, fue la ubicación de los nodos transmisores y concluyen que la distancia entre los nodos y la interferencia entre ellos no tuvieron un impacto significativo en la calidad del enlace. Sin embargo, se observó que al realizar cambios en la orientación de la antena y en la potencia de transmisión de los nodos, se disminuía considerablemente la pérdida de paquetes en cada uno de los enlaces.

En cada uno de los trabajos anteriores los autores describen la metodología que utilizaron para el desarrollo de los experimentos y con ello caracterizar los diversos entornos de propagación al considerar el uso de redes WPAN. En otros trabajos, los autores desarrollan modelos de canal utilizando algún software de simulación para caracterizar entornos de propagación en industrias [13], [14], incluso otros, realizan evaluaciones experimentales para caracterizar y evaluar el impacto del entorno de propagación en los algoritmos de acceso al medio que utilizan los dispositivos 802.15.4 [15]. Sin embargo, al comparar los resultados en cada uno de los trabajos, se puede observar que las características de operación del canal de comunicación son diferentes entre uno y otro, la potencia recibida (RSSI) es completamente aleatoria y las evaluaciones de caudal eficaz y PER no siguen un patrón. Es posible establecer que los entornos de propagación y el canal de comunicación son irregulares, así como los patrones de radiación de las antenas de los dispositivos no son idealmente omnidireccionales, por lo que la red WPAN dependerá de múltiples factores (tipo de tecnología, potencia de transmisión, velocidad de transmisión, interferencia, objetos y personas en el entorno, entre otros) para su buen desempeño. En base a lo anterior, se propone el siguiente objetivo de investigación.

1.4 Objetivo general

Desarrollar e implementar una plataforma de prueba que permita evaluar experimentalmente las características de operación del canal radio y el impacto del entorno de propagación en dispositivos WPAN que operan bajo el estándar IEEE 802.15.4.

1.5 Metas de la tesis

- Determinar, mediante una caracterización temporal, los factores dominantes que tienen mayor impacto en la calidad de los enlaces de comunicación en una red WPAN para distintos entornos de propagación.
- Determinar, mediante una caracterización espacial, el patrón de radiación de los dispositivos WPAN – IEEE 802.15.4 para diferentes entornos de propagación.
- Considerando los datos experimentales, desarrollar e implementar una herramienta computacional que permita evaluar una red WPAN en distintos entornos de propagación.

1.6 Organización de la tesis

El contenido de esta tesis se ha estructurado en seis capítulos.

En el capítulo 2, se presenta un resumen de las características de los diferentes modelos de propagación existentes en la literatura. Se incluye en este capítulo, la descripción de modelos estadísticos y empíricos utilizados en la caracterización de canal, tanto para entornos macrocelulares, microcelulares e interiores.

En el capítulo 3, se presentan las características del protocolo de comunicación ZigBee (IEEE 802.15.4), se analiza con detalle la capa física incluyendo las frecuencias de operación, modulación, tasas de transferencias de datos y aplicaciones.

Los escenarios y descripción de los experimentos se detallan en el capítulo 4. En este capítulo, se detalla la metodología que se siguió para realizar el experimento y caracterizar los entornos de propagación. Se consideraron tres entornos de propagación, dos exteriores y uno en interiores; con el fin de determinar los factores que mayor impacto tienen en el desempeño de los dispositivos inalámbrico. Aquí también se describen los parámetros utilizados en los dispositivos de prueba; tales como, cantidad y longitud del paquete, modulación, velocidad de transmisión, entre otros.

En el capítulo 5, se analizan los resultados obtenidos de la etapa de experimentación. De esta forma, se provee información del comportamiento de cada uno de los entornos de propagación, así como también, de las características de los dispositivos utilizados en la experimentación. Aquí se valida que las patrones de radiación de los dispositivos no son omnidireccionales.

Por último, el capítulo 6 presenta el resumen y conclusiones del estudio y caracterización de los distintos entornos de propagación considerados en este trabajo. En este capítulo también se presenta una serie de líneas de trabajo que quedan abiertas para su desarrollo así como otra serie de ideas que pueden ser de interés para abrirse en el futuro.

Capítulo 2

Modelos de propagación para ambientes microcelulares y picocelulares

El auge de Internet y de las comunicaciones inalámbricas multimedia demanda mayores velocidades de transmisión y anchos de banda. En toda comunicación inalámbrica, el canal radio se considera un medio de transmisión hostil debido a los desvanecimientos generados por la propagación multitrayectoria, lo anterior provoca una reducción en la calidad y fiabilidad del canal y en consecuencia de la velocidad de comunicación. Por otra parte, el desarrollo de nuevos sistemas inalámbricos (por ejemplo, ZigBee, Bluetooth, RFID, WLAN, WPAN, entre otros), demanda también el desarrollo de nuevos dispositivos, más ligeros y de menor potencia de transmisión, esto trae como consecuencia diseñar celdas o áreas de cobertura de menor tamaño. Estas celdas de menor tamaño se pueden clasificar como microcélulas (células con radio bases que se localizan por debajo de una altura determinada) y picocélulas (células que se localizan en entornos interiores) [1]. En este capítulo se presentan teoría y conceptos básicos relacionados con la propagación de señales en exteriores (microcélulas) e interiores (queda fuera de este trabajo entornos macrocelulares), y se describen algunos modelos de propagación aplicados en estos entornos.

2.1 Conceptos básicos en propagación

De los fenómenos más comunes que se presentan en los distintos entornos de propagación donde se utilizan estas nuevas redes inalámbricas, podemos mencionar la reflexión ocasionada por la generación de múltiples rayos (copias de la señal original) y el fenómeno de transmisión ocasionada por las paredes que bloquean la señal en trayectoria.

La propagación de señales es la forma en que se comporta cada una de ellas en el viaje que realizan desde el emisor hasta el receptor, existen ciertos factores que intervienen

en ese trayecto, conocidos como mecanismos básicos de propagación; refracción, reflexión, dispersión y difracción.

La refracción es el cambio de dirección de una señal cuando ésta choca con un material de distintos parámetros, esto es, que el material tenga un índice de refracción diferente. En la refracción intervienen dos ángulos, el de incidencia y el de transmisión, y están relacionados entre sí por la ley de refracción de Snell. Esta ley de refracción, como se muestra en la ecuación (2.1), establece que el ángulo, θ_t , está en función del ángulo de incidencia y el material de los dos medios y, θ_i es el ángulo del campo incidente. Los valores de n_1 y n_2 , corresponden a los índices de refracción del medio 1 y del medio 2 respectivamente, ϵ_1 , y ϵ_2 , son los valores de permitividad del material y, μ_1 y μ_2 corresponden a los valores de permeabilidad.

$$\frac{\sin(\theta_t)}{\sin(\theta_i)} = \frac{n_2}{n_1} = \sqrt{\frac{\epsilon_2 \mu_2}{\epsilon_1 \mu_1}} \quad (2.1)$$

Se denomina índice de refracción, a la relación que existe entre la velocidad de propagación de la luz en el espacio libre, c , y la velocidad de fase de la luz, v , en un material transparente, esto está representado por la ecuación (2.2);

$$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\frac{\epsilon \mu}{\epsilon_0 \mu_0}} = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (2.2)$$

La reflexión es el mecanismo de propagación que ocurre cuando una señal golpea un objeto de dimensiones más grandes que su longitud de onda. Una parte de la señal emitida se transmite dentro del objeto, siempre y cuando no sean materiales conductores perfectos y, la otra parte de la señal se refleja. Los ángulos de reflexión, θ_r , y el de incidencia, θ_i , son iguales como lo enuncia la ley de reflexión de Snell.

La difracción de señales, se refiere a la curva que éstas realizan alrededor de un objeto, lo que provoca un cambio de dirección de la señal. Éste cambio de dirección está relacionada directamente con el tamaño del obstáculo y la longitud de onda de la señal, es decir; a mayor longitud de onda o menor grosor del objeto, mayor cambio de dirección. Aunque la difracción puede ocasionar pérdidas en la señal, su ventaja radica en que, aún

cuando no exista línea de vista entre transmisor y receptor, permite la propagación de señales de RF sobre la superficie curva de la Tierra más allá del horizonte, además de superar obstáculos.

Para calcular los campos reflejados y transmitidos, se utilizan los coeficientes de reflexión y transmisión de Fresnel. Dichos coeficientes dependen de los parámetros que constituyen los materiales, de la polarización del campo incidente y del ángulo de incidencia. Los coeficientes de Fresnel varían según la polarización de los campos; si es paralela o perpendicular. Los campos perpendiculares o paralelos del campo eléctrico se toman con respecto al plano que contiene los rayos incidentes, reflejados y transmitidos. Las componentes paralelos están contenidas en el plano de reflexión mientras que las componentes perpendiculares son perpendiculares al plano de reflexión.

Para reflexiones que ocurren en superficies conductoras no-perfectas, los coeficientes de reflexión de Fresnel de onda plana se calculan mediante las ecuaciones (2.3) y (2.4);

$$R_{\perp}(\theta) = \frac{\cos(\theta) - \sqrt{\varepsilon' - \sin^2(\theta)}}{\cos(\theta) + \sqrt{\varepsilon' - \sin^2(\theta)}} \quad (2.3)$$

$$R_{\parallel}(\theta) = \frac{\varepsilon' \cos(\theta) - \sqrt{\varepsilon' - \sin^2(\theta)}}{\varepsilon' \cos(\theta) + \sqrt{\varepsilon' - \sin^2(\theta)}} \quad (2.4)$$

Donde $\varepsilon' = \varepsilon/\varepsilon_0 - j\sigma/(\omega\varepsilon_0)$, con $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$ como la permitividad del material, σ representa la conductividad, y θ el ángulo de incidencia formado por el rayo incidente y el vector normal a la superficie.

El campo transmitido se puede expresar mediante los coeficientes de transmisión dados por las ecuaciones (2.5) y (2.6);

$$T_{\perp} = \frac{2\cos(\theta_i)}{\cos(\theta_i) + \sqrt{\varepsilon' - \sin^2(\theta_i)}} \quad (2.5)$$

$$T_{\parallel} = \frac{2\sqrt{\epsilon'} \cos(\theta_i)}{\epsilon' \cos(\theta_i) + \sqrt{\epsilon' - \sin^2(\theta_i)}} \quad (2.6)$$

En la figura 2.1, se muestra el comportamiento de los coeficientes de reflexión y de transmisión para tierra seca en función del ángulo de incidencia de la señal, para lo anterior se utilizó una frecuencia de transmisión a 2 Ghz, una permitividad relativa $\epsilon_r = 3$ y conductividad $\sigma = 7 \times 10^{-4}$. Para la figura 2.2, se consideró un escenario con tierra húmeda, una frecuencia de transmisión de 2 Ghz, permitividad relativa $\epsilon_r = 15$ y conductividad $\sigma = 4 \times 10^{-1}$.

En la figura 2.3, se consideró el mismo procedimiento que para obtener las figuras 2.1 y 2.2, sin embargo, en este caso los coeficientes de reflexión y de transmisión corresponden para una pared de ladrillo, utilizando una frecuencia de transmisión de 2 Ghz, una permitividad relativa $\epsilon_r = 4.26$ y conductividad $\sigma = 0.01$.

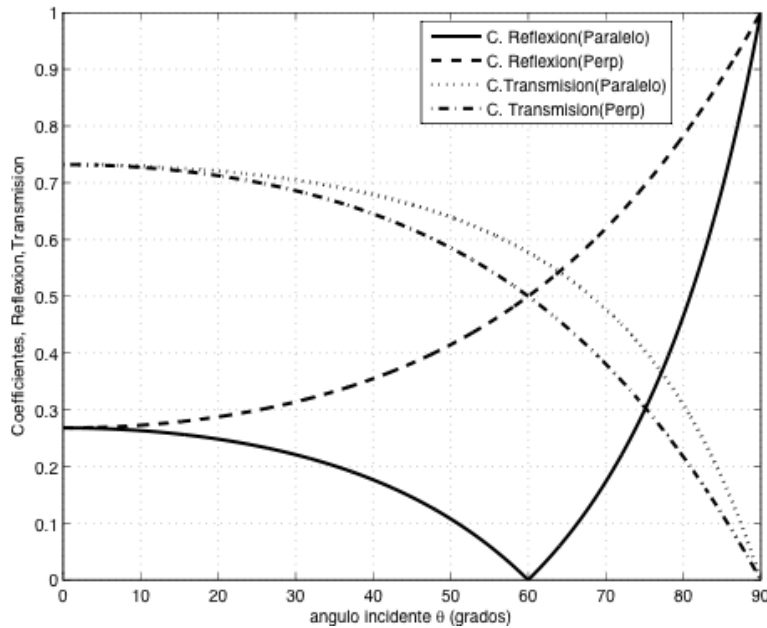


Figura 2.1. Magnitud de los coeficientes de reflexión y transmisión para tierra seca @2 Ghz

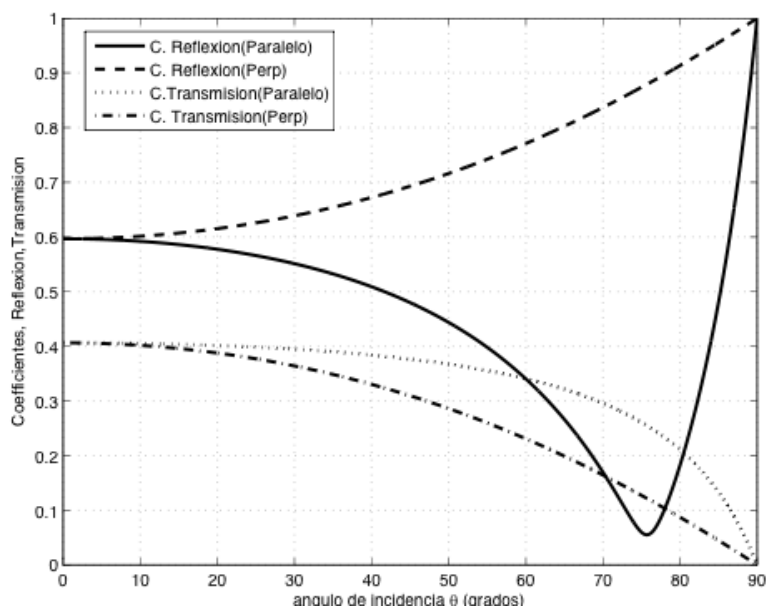


Figura 2.2. Magnitud de los coeficientes de reflexión y transmisión para tierra húmeda @2 Ghz

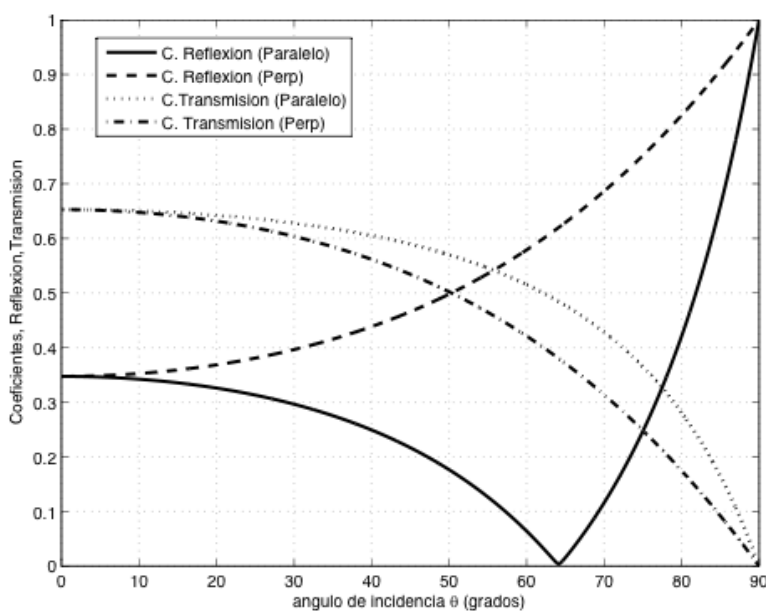


Figura 2.3. Magnitud de los coeficientes de reflexión y transmisión para una pared de ladrillo @2 Ghz

En las figuras 2.1-2.3, se puede observar que para la propagación paralela a la tierra, los coeficientes paralelos representan los coeficientes de polarización vertical y los coeficientes de polarización perpendicular representan una polarización horizontal. Sin

embargo, para las reflexiones en pared esta equivalencia es inversa. También, en las figuras se observa que cuando el ángulo de incidencia tiende a 90° , el coeficiente de reflexión se aproxima a 1 en todos los casos, mientras que los coeficientes de transmisión toman valores de cero. A esta situación se le conoce como incidencia rasante (grazing incidente) y, en la práctica está relacionado a que la antena transmisora se encuentra por debajo, en altura, comparada con la distancia al receptor. En estos casos el coeficiente de reflexión puede ser asumido como -1 para polarización horizontal y $+1$ para vertical. También se puede observar que los coeficientes de reflexión paralela se vuelven cero o cercanos a cero en un determinado ángulo de incidencia, conocido como ángulo pseudo-Brewster, $\theta_B = \tan^{-1}(n_2/n_1)$. El valor del ángulo pseudo-Brewster para un material de referencia, permite definir la posición del polarizador respecto al plano de incidencia con el fin de obtener una reflexión mínima. Para ángulos de incidencia mayores al ángulo de Pseudo-Brewster, la señal se refleja en fase con la señal directa y, para valores menores a este ángulo, la onda reflejada experimenta un cambio de fase de entre 90° y 180° con respecto a la onda directa ocasionando una posible cancelación de la señal. Existen varias formas de reducir el efecto de cancelación de la señal, sin embargo, la mejor forma de hacerlo es ajustando la altura de la antena, ya sea hacia arriba o hacia abajo.

En escenarios de interiores o propagación de exterior-interior, la caracterización de la atenuación que producen las paredes es importante. Para esto, se utiliza un modelo común de pared que considera un tramo largo, rectangular de estructura uniforme y limitada por paredes de profundidad finita. El medio de propagación en ambas paredes es homogéneo e isotrópico y las paredes se consideran planas en los puntos donde se realiza la transmisión. Aplicando la ley de Snell, se observa que el ángulo de incidencia, θ_0 , sobre la primera pared es igual al ángulo de transmisión, θ_2 , que sale de la segunda pared. Por lo que para la primera pared tenemos que;

$$\beta_0 \sin(\theta_0) = \beta \sin(\theta_1) \quad (2.7)$$

Y para la segunda pared tenemos;

$$\beta \sin(\theta_1) = \beta_0 \sin(\theta_2) \quad (2.8)$$

Si igualamos ambas expresiones se tiene que $\theta_0 = \theta_2$, lo que significa que el rayo transmitido que atraviesa la pared es paralelo al rayo entrante en el otro extremo. En el caso de propagación en interiores debe tomarse en cuenta el grosor de las paredes. El coeficiente de *reflexión generalizado o efectivo* correspondiente a la suma de múltiples reflexiones dentro de una pared, está dada por;

$$R_{ef} = R \left\{ 1 - \frac{(1 - R^2) e^{(-2\alpha s)} e^{(-2j\beta s)} e^{[jk_0 d \sin(\theta)]}}{1 - R^2 e^{(-2\alpha s)} e^{(-2j\beta s)} e^{[jk_0 d \sin(\theta)]}} \right\} \quad (2.9)$$

Donde k_0 representa la constante de fase en el espacio libre, mientras que α y β son la atenuación de onda plana y constante de fase del medio.

Para el *coeficiente de transmisión efectiva*, se incluye el efecto que sufre la onda transmitida a través de la pared y la atenuación de energía que experimenta debido a las diversas reflexiones dentro de la pared, esto es;

$$T_{ef} = \frac{(1 - R^2) e^{(-\alpha s)} e^{(-j\beta s)}}{1 - R^2 e^{(-2\alpha s)} e^{(-2j\beta s)} e^{[jk_0 d \sin(\theta)]}} \quad (2.10)$$

Las expresiones para obtener los valores de α y β se describen a continuación;

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu \epsilon}{2}} \sqrt{\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon}\right)^2} - 1} \quad (2.11)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu \epsilon}{2}} \sqrt{\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon}\right)^2} + 1} \quad (2.12)$$

El parámetro s , representa la longitud de la trayectoria que viaja la onda de un lado al otro de la pared (l representa el grosor de la pared) y d , se obtienen de las siguientes expresiones;

$$s = \frac{l}{\sqrt{1 - \frac{\sin^2(\theta)}{\epsilon_r}}} \quad (2.13)$$

$$d = \frac{2l}{\sqrt{\frac{\epsilon_r^2}{\sin^2(\theta)} - 1}} \quad (2.14)$$

Las figuras 2.4 y 2.5 muestran la dependencia del coeficiente de reflexión con respecto a la frecuencia de la señal y al grosor de la pared respectivamente. Se puede observar en la figura 2.5, la diferencia que existe en el orden de magnitud de las pérdidas por transmisión para una pared con grosor de 10 cm con respecto a una de 20 cm. Los coeficientes de transmisión y reflexión para un grosor de 20 cm son aproximadamente 0.25 y 0.08, los cuales en dB ($20\log$) significa una atenuación de -12 dB y -22 dB respectivamente.

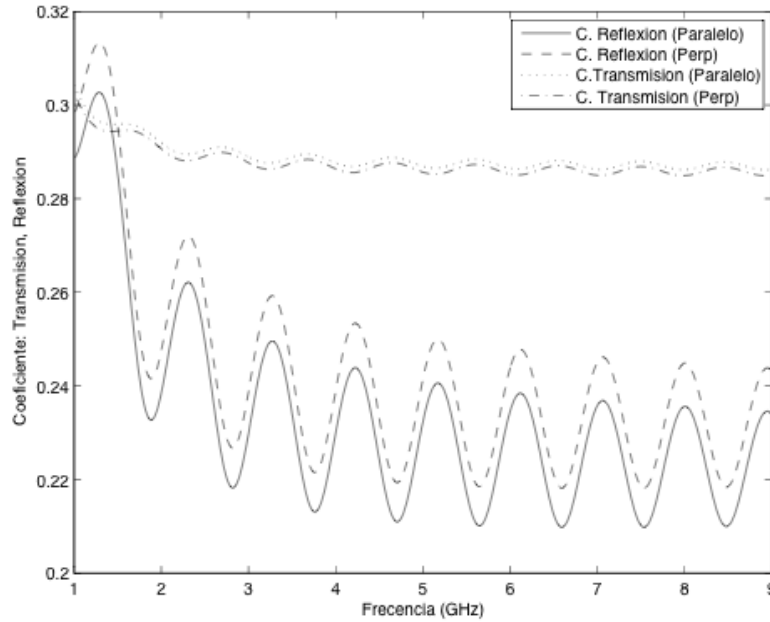


Figura 2.4. Coeficientes de Reflexión y Transmisión generalizados en función de la frecuencia para un ángulo de incidencia de 10° , $\epsilon=2.5\epsilon_0$, $\sigma=0.01$ y grosor de la pared=10 cm

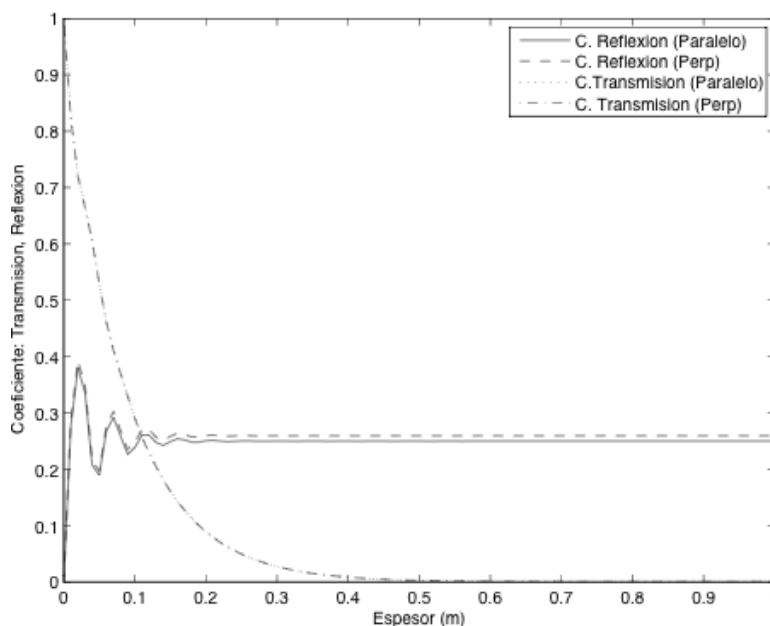


Figura 2.5. Coeficientes de Reflexión y Transmisión generalizados en función del grosor de la pared para un ángulo de incidencia de 10° , $\epsilon=2.5\epsilon_0$, $\sigma=0.01$ y frecuencia= 2 GHz

Los modelos anteriores proporcionan una aproximación adecuada en el cálculo de las pérdidas por transmisión que sufre una señal, sin embargo, estos modelos consideran la estructura y las propiedades de los materiales de la pared homogéneos. En la práctica, es común utilizar modelos de propagación empíricos que consideran valores de pérdidas por transmisión derivados de mediciones experimentales. En la siguiente sección se describen algunos de esos modelos empíricos.

2.2 Clasificación de los modelos de propagación

Los modelos de propagación se consideran como un conjunto de expresiones matemáticas, diagramas y algoritmos los cuales sirven para simular y representar las características en un entorno de propagación determinado. Generalmente los modelos de predicción se pueden clasificar en empíricos o estadísticos, teóricos o deterministas o una combinación de estos dos (semi-empíricos).

Mientras que los modelos empíricos o estadísticos se basan en mediciones, los modelos teóricos lo hacen en los principios fundamentales de los fenómenos de propagación de ondas de radio y a diferencia de los anteriores no se sustentan sobre amplias mediciones sino que disponen de detalles del entorno con lo que podemos estimar la propagación de la señal [15].

Dentro de los empíricos (o estadísticos) se pueden citar modelos para macrocélulas como microcelulas, utilizados en entornos exteriores, como una ciudad o una calle, sin embargo los modelos para exteriores no se consideran en este trabajo. Son importantes en este grupo el modelo de Okumura, uno de los más utilizados en zonas urbanas, el de HATA que se establece una expresión cerrada a partir de las mediciones del modelo de Okumura, el COST-231-Walfisch-Ikegami que hace uso del modelo Walfisch-Bertoni o el de Doble pendiente (Dual-Slope) que se basa en el modelo de dos rayos. Éste último se utiliza cuando la antena transmisora se encuentra varias longitudes de onda por encima de la horizontal del plano del suelo. Todos estos modelos se traducen en procedimientos matemáticos simples de implementar aunque se recomienda utilizarlos cuando se requiere poca precisión de la estimación de las condiciones de propagación.

Sin embargo, los modelos deterministas utilizan las ecuaciones de Maxwell para el cálculo computacional de las características de la propagación que se desean estudiar. Desafortunadamente requieren de operaciones matemáticas muy complejas y como consecuencia de altos requerimientos computacionales.

Con estos modelos de propagación se predice la pérdida en la trayectoria que una señal de Radiofrecuencia (RF) pueda tener entre una estación base y un receptor ya sea móvil o fijo. La ventaja de modelar radiocanales teniendo en cuenta las características de la trayectoria entre Transmisor (Tx) y Receptor (Rx), permite conocer la viabilidad de los proyectos que se deseen planear en determinados sectores, de esta manera se podrá hacer una estimación acerca de la necesidad, costos y capacidad de los equipos requeridos (especificaciones técnicas), conclusión a la que se puede llegar con una herramienta que implementara adecuadamente un fiable modelo de propagación. Evidentemente la calidad de un modelo u otro se mide por la veracidad de los resultados en comparación con medidas de campo reales.

Los modelos de propagación para interiores se pueden clasificar en tres grupos:

1.- Modelos electromagnéticos.- se derivan principalmente de las ecuaciones de Maxwell para la propagación de ondas electromagnéticas. De los métodos más utilizados se encuentran el FDTD (Diferencias finitas en el dominio del tiempo). Con este modelo se aproximan las ecuaciones de Maxwell por un sistema de ecuaciones en el cual se consideran las características físicas de la propagación.

2.- Modelos Estadísticos.- estos modelos no requieren información acerca del material de construcción de la paredes, solo es necesario conocer las características del entorno de propagación donde se instalará la red de comunicaciones, es decir si la comunicación se llevará a cabo en un hotel, oficina, casa, entre otros.

3.- Modelos empíricos.- que pueden ser de trayectoria directa o mutitrayectoria, estiman la predicción del entorno de propagación en base al cálculo por computadora de las características de los mecanismos de propagación, como reflexión, difracción con respecto a las paredes o el suelo por donde viaja la señal.

2.3 Modelos de propagación para interiores

En entornos microcelulares, las mediciones han mostrado que la atenuación de una señal es dependiente de la distancia que recorre. Por lo que las pérdidas por trayectoria se describen, de manera general, mediante la expresión;

$$l(d) = kd^n \quad (2.15)$$

Donde d , es la distancia que existe entre transmisor y receptor, n es el coeficiente de atenuación, y la constante k representa las pérdidas por trayectoria a una distancia de referencia de 1 o 100 metros con respecto a las pérdidas en el espacio libre. Por lo que, un modelo de propagación microcelular se puede describir por la siguiente expresión;

$$L(d) = L_{fs}(1m) + 10n \log d \quad (2.16)$$

Donde d es la distancia en metros y L y L_{fs} en dB. Para introducir las dos pendientes (slopes), debe agregarse un segundo término para distancias más allá del punto de ruptura (break point) d_B ,

$$\begin{aligned} l_1(d)\alpha d^{n_1} & \quad \text{para } d < d_B \\ l_2(d)\alpha d_B^{n_1} \left(\frac{d}{d_B}\right)^{n_2} & \quad \text{para } d > d_B \end{aligned} \quad (2.17)$$

Las pérdidas por trayectoria para el caso donde no existe línea de vista entre transmisor y receptor (NLOS), se modelan de la misma forma que para el caso con línea de vista (LOS), solo que se asume que la Estación Base se encuentra ubicada en una posición de frente a la calle NLOS. Las pérdidas totales serán la suma (en dB) de las pérdidas hasta la unión de las calles y las pérdidas en el lado de la calle. Algunos parámetros típicos para trayectorias LOS @1.8 GHz son; $n_1=2.3$, $n_2=5.6$ y $d_B=250$ m.

Las condiciones de propagación en interiores difieren considerablemente de aquellas encontradas en entornos exteriores. Las distancias entre transmisor y receptor son más pequeñas debido a la atenuación que provocan paredes, pisos y muebles, además de la baja potencia de transmisión que utilizan los dispositivos. Los modelos empíricos normalmente consideran tres tipos de trayectorias;

- LOS (line-of-sight), existe total o parcial visualización entre transmisor y receptor, esto sucede en habitaciones abiertas o pasillo sin objetos que bloqueen la visión.
- OLOS (obscured line-of-sight), paredes delgadas u objetos bloquean la señal directo
- NLOS (non-line-of-sight), no existe visibilidad entre dispositivos.

Diferentes expresiones han sido propuestas para calcular las pérdidas por trayectoria. Algunas expresiones se basan en la ley de distancias, como el caso para entornos macrocelulares, es decir;

$$L(d) = 10n \log(d) + K_1 \quad (2.18)$$

Para este caso los valores típicos para $n=3$ en el caso de situaciones de LOS, 4 para OLOS y 6 para NLOS. Otros modelos utilizan coeficientes de atenuación lineal, por ejemplo;

$$L(d) = 20\log(d) + \alpha d + K_2 \quad (2.19)$$

En este caso se toma como referencia las pérdidas en el espacio libre $n=2$, y valores típicos de α se encuentran en el rango de 0.2 a 0.6.

Aunque podría parecer que predecir el comportamiento de la señal en un entorno interior es más sencillo que en un exterior, la realidad es que resulta ser más complejo, lo anterior se debe a que el campo eléctrico de la señal está conformado por una mayor cantidad de componentes y las variaciones de la señal son lentas. En la siguiente sección se describen algunos de los modelos que se pueden utilizar para modelar entornos de propagación en interiores.

2.3.1 Modelo empírico ITU-R

Desde el punto de áreas de cobertura, se menciona en la literatura que existen seis tipos de sistemas de comunicaciones inalámbricos [22]. Los equipos de comunicación personal que normalmente utilizamos, pasan una gran cantidad de tiempo dentro de los edificios, por lo que las áreas de cobertura que se requieren para atender las solicitudes de cada uno de los usuarios son relativamente pequeñas, de tamaño microcelular o picocelular, comparadas con las coberturas de los sistemas satelitales o celulares (megacelular o macrocelulares).

La propagación dentro de edificios está afectada principalmente por dos factores; la atenuación debido a las paredes que tiene que atravesar la señal, y por la difracción ocasionada por los obstáculos presentes. Existe una aproximación para caracterizar las pérdidas en interiores, conocido como modelo ITU-R. Este modelo es estable debido a la utilización de variables que se pueden conocer sin necesidad de hacer mediciones. Caracteriza las pérdidas del espacio libre, la frecuencia de la señal así como los factores de pérdida relacionados con el número de suelos y muros que atraviesa la línea de visión directa entre emisor y receptor, la ecuación que describe el comportamiento de este modelo se define en la siguiente expresión;

$$L = L_1 + 20\text{Log}_{10}(fc) + 10n\text{Log}_{10}(r) + L_f(n_f) - 28 \quad (2.20)$$

Donde r representa la distancia en metros entre transmisor y receptor dentro del edificio, L_1 son las pérdidas de referencia, f_c la frecuencia de transmisión en GHz, $L_f(n_f)$ es el factor de pérdidas por penetración en pisos debido al material del suelo penetrado y n_f representa el número de suelo penetrado para el cálculo de las pérdidas. El factor de pérdidas por atenuación n , depende de la frecuencia de operación y del entorno en el que se propaga la señal. La tabla 2.1 muestra la forma en que el modelo ITU-R calcula las pérdidas por penetración en pisos, a partir del número de pisos penetrados, n_f .

Tabla 2.1. Valores típicos para el factor de penetración en edificios $L_f(n_f)$

Frecuencia de operación	Residencia	Oficina	Comercial
900 Mhz		9 para un piso	
		19 para dos pisos	
		24 para tres pisos	
1.8-2.0 GHz	$4 n_f$	$15+4(n_f-1)$	$6+3(n_f-1)$

2.3.2 Modelo Cost-231 Multi-Pared

Otros modelos empíricos requieren de datos de entrada más detallados, por ejemplo, el Modelo COST 231 de Múltiples Paredes (Multi-wall), el cual calcula las pérdidas por trayectoria como la suma de las pérdidas en el espacio libre y las pérdidas debido a las paredes o pisos que atraviesa la señal. La expresión para este modelo está dada por;

$$L = L_{fs} + L_C + \sum_{i=1}^l k_{w-i} L_{w-i} + L_f k_f \left(\frac{k_f+2}{k_f+1} b \right) \quad (2.21)$$

Donde L_{fs} representa las pérdidas en el espacio libre, L_c es una constante de pérdidas, k_{w-i} corresponde a la cantidad de paredes del tipo i que son atravesadas, k_f es el número de pisos atravesados, L_{w-i} es la pérdida en dB por penetración de la pared tipo i , L_f ,

es la atenuación debido al piso que atraviesa la señal, b es un parámetro constante empírico y l representa el numero de paredes consideradas en el modelo. Las paredes se clasifican en paredes ligeras (por ejemplo, tabla roca o de concreto delgadas) y algunos valores típicos recomendados para este modelo se pueden observar en la siguiente tabla;

Tabla 2.2. Valores recomendados para modelo COST231 Multi pared

FRECUENCIA (MHz)	L_w (dB)	L_f (dB)	b
900	1.9	14.8	0.46
1800	3.4 (paredes ligeras o paredes con muchas ventanas) 6.9 (paredes gruesas, ejemplo: ladrillo, hormigón)	18.3	0.46

2.3.3 Modelos determinísticos

Se basan principalmente en la física de la propagación de ondas de radio y los fenómenos que la rodean. Pueden aplicarse a diferentes entornos sin afectarles su precisión. En la práctica su implementación requiere enormes bases de datos con las características relativas al entorno, las cuales son imposibles o inviables de obtener de manera práctica.

Los algoritmos usados por los modelos deterministas son generalmente muy complejos y computacionalmente poco eficientes. Por esta razón su implementación se restringe a pequeñas áreas. Por el contrario, si su implementación es correcta, proporcionan gran precisión en su predicción con los modelos empíricos. Actualmente son los más utilizados debido a que ofrecen mejores resultados que los estadísticos en cuanto a precisión.

2.3.4 Modelo trazado de rayos (Ray Tracing)

El algoritmo de trazado de rayos, hace una simulación de cada una de las trayectorias que surgen después de que la señal es reflejada en los diversos objetos y

dispersores en el entorno, la predicción de señal se basa en calcular el recorrido de la señal en el espacio libre, considerando las reflexiones producidas en las paredes. En este modelo, como se muestra en la figura 2.6, pueden considerarse varios rayos, entre más rayos se consideren más exacto será el modelado de canal.

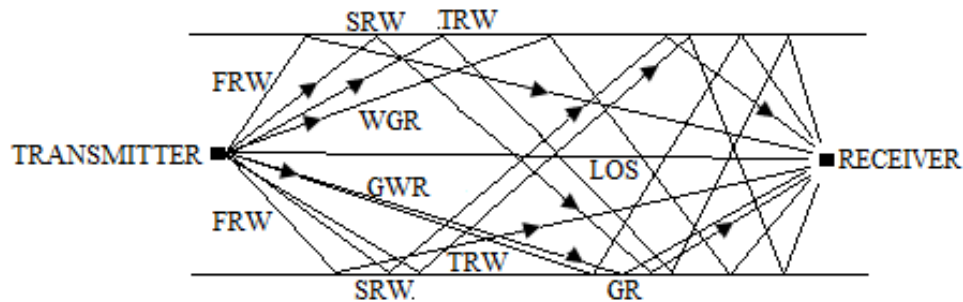


Figura 2.6. Representación geométrica del modelo Ray-Tracing

En la figura 2.6 se puede observar la geometría considerada para el modelo de Trazado de Rayos considerando diez rayos. Seis rayos, representados por las siglas FRW, corresponden a un solo reflejo, los rayos SRW corresponden a dos reflejos en las paredes y TRW representa las señales que sufrieron tres reflejo entre las paredes del entorno, también se pueden observar otros dos rayos los cuales tienen reflejo entre el suelo y la pared (GWR) y la pared y el suelo (WGR), uno más con un reflejo en el suelo (GR) y finalmente el rayo en línea de vista directa (LOS).

En los modelos básicos de trazado de rayos como el de la figura 2.6, la predicción se basa en cálculos de transmisión en espacio abierto considerando el efecto de reflexión de las paredes y teniendo en cuenta una única reflexión. Los algoritmos de trazado de rayos más complejos incluyen mecanismos de difracción, dispersión difusa y penetración a través de diversos materiales. La expresión para este modelo está dada por;

$$P \approx P_t \left[\frac{\lambda}{4\pi} \right]^2 \left| \frac{\sqrt{G_t}}{L} + \frac{R \sqrt{G_r} e^{j\Delta\theta}}{X i} \right|^2 \quad (2.22)$$

Donde P_t es la potencia de transmisión, $\sqrt{G_t}$ es el producto de del patrón de radiación de las antenas de los dispositivos transmisor y receptor, correspondiente al rayo con línea de vista directa (LOS), $\sqrt{G_r}$ es el producto de del patrón de radiación de las antenas de los dispositivos transmisor y receptor, correspondiente al rayo con algún reflejo, así ambos productos $\sqrt{G_t}$ y $\sqrt{G_r}$ son típicamente 1, para una antena omnidireccional, la fase con la que llega la señal está representado por $\Delta\theta = 2\pi (X + X_1)/l$.

Así, el coeficiente de reflexión esta dado por

$$R \approx \frac{\sin\theta - Z}{\sin\theta + Z} \quad (2.23)$$

Y la polarización de las antenas, ya sea para una polarización vertical (2.24) y una polarización horizontal (2.25)

$$Z \approx \sqrt{\epsilon_r - \cos^2\theta} / \epsilon_r \quad (2.24)$$

$$Z \approx \sqrt{\epsilon_r - \cos^2\theta} \quad (2.25)$$

Para este caso ϵ_r es la constante dieléctrica del terreno, para un entorno interior es aproximadamente de 15 [17].

En conclusión, el nivel de señal en un punto determinado se obtiene mediante la suma de los componentes de todos los caminos posibles existentes entre transmisor y receptor. Además de las pérdidas de propagación, en estos modelos se pueden predecir de manera fiable la dispersión en el tiempo de la señal. Hoy en día los modelos de trazado de rayos están considerados entre los más precisos de entre los modelos de predicción de potencia de campo; sin embargo, requieren una representación muy detallada del área a

analizar. La precisión del modelo depende en gran medida de la precisión y completitud/complejidad de la base de datos asociada a la representación.

2.3.5 Modelo Fine-Difference Time-Domain (FDTD)

Con los modelos que hacen uso de la Óptica Geométrica (GO) y de la Teoría Uniforme de la Difracción (UTD) se obtienen soluciones relativamente simples para el estudio de la radio propagación. Sin embargo sabemos que GO obtiene buenos resultados cuando considera elementos eléctricamente grandes, y que UTD es rigurosa cuando se estudia el caso de conductores perfectos. Para el caso de que en el entorno existan estructuras con pérdidas y de dimensiones finitas, el modelo de Trazado de Rayos no es la solución óptima. Este aspecto se vuelve más crítico cuando en los sistemas de comunicación tanto las antenas transmisoras como receptoras se colocan cercanas a estructuras de materiales complejos para los que no podemos aplicar soluciones asintóticas, aunque si la solución a las ecuaciones de Maxwell [16].

El método FDTD (Finite-Difference Time-Domain) es el método más utilizado para la obtención de una solución numérica de las ecuaciones de Maxwell. En este método las ecuaciones de Maxwell se aproximan por medio de un conjunto finito de ecuaciones diferenciales. Antes de realizar los cálculos es necesario definir una cuadrícula específica (regular o irregular) sobre el área de interés. Una vez que estas condiciones iniciales han sido definidas, el algoritmo FDTD emplea las diferencias centrales para aproximar las derivadas tanto en el espacio como en el tiempo. En los nodos de la cuadrícula la solución se determina iterativamente, resolviéndose de este modo las ecuaciones de Maxwell directamente.

Al igual que los modelos basados en trazado de rayos, los modelos FDTD son muy exigentes computacionalmente. El tiempo de computación depende proporcionalmente del tamaño del área que se analiza, pero no depende significativamente de los detalles incluidos en su descripción. Sin embargo el número de nodos de la cuadrícula está exponencialmente relacionado al tamaño del área y la frecuencia de operación.

Las ventajas de este modelo son su exactitud y facilita una solución completa para todos los puntos de una geometría, esto permite obtener mapas de cobertura de un área determinada. La precisión del modelo FDTD es comparable a la de los modelos basados en trazado de rayos, y la predicción es tan precisa como pueda serlo la base de datos de descripción del área.

Debido a su complejidad computacional, los modelos FDTD son aconsejables sólo en tareas de predicción de campo en pequeñas áreas. Para áreas de mayor tamaño los modelos de trazado de rayos son más recomendables [18].

2.3.6 Modelo basado en redes neuronales (ANN; Artificial Neural Networks)

Existen modelos que utilizan tanto modelos empíricos como deterministas, y otro tipo de modelos como el siguiente, que utilizan diversas técnicas.

El problema principal que presentan los modelos empíricos es su falta de precisión. Por otro lado, los modelos deterministas se caracterizan por su falta de eficiencia, ya que adolecen de grandes requerimientos computacionales. Se puede alcanzar un compromiso entre ambos problemas mediante los modelos de red ANN (Artificial Neural Network) [19].

Este modelo está basado en redes neuronales de perceptrones multinivel. La implementación del modelo ANN requiere de una base de datos con las características del entorno en donde se requiera utilizar el modelo, como son, pasillos, paredes, ventanas, escritorios, entre otros. Una manera fácil y efectiva para tener un plano general de estas características es utilizando una fotografía, donde se puedan apreciar todos los objetos que actuarán como obstáculos o interferentes.

Al modelo hay que proporcionarle en primer lugar las categorías de objetos que existen en el entorno, la distancia normalizada entre emisor y receptor y finalmente información sobre el número y tipo de materiales que se va a encontrar de los diferentes tipos de las categorías. La salida del modelo es el nivel de campo resultante. Para determinar los parámetros del modelo, hay que proporcionarle datos de medidas tomadas

sobre el terreno (datos de entrenamiento). Determinar los parámetros para este modelo es muy simple, a su vez el análisis estadístico no es necesario. Este modelo trabaja con datos de mediciones, aunque el proceso computacional es extenso, sin embargo, solo se realiza el proceso una vez, presenta una precisión comparable con los modelos Ray-Tracing y el FDTD [19].

Aunque los procesos de aprendizaje pueden tomar varias horas, el proceso posterior para la predicción de niveles es rápido. La precisión de cada modelo obtenido depende en gran medida de la complejidad de los nodos o neuronas de las que esté compuesta.

A pesar de lo anterior, las redes neuronales multicapa presentan inconvenientes de una convergencia lenta e impredecible en la búsqueda de la solución durante el aprendizaje. Para superar esto, se pueden utilizar funciones de base radial (Radial Base Functions, RBFs) que mejoran la capacidad y tiempo de aprendizaje.

2.3.7 Modelo Saleh-Valenzuela

Este modelo estadístico fue creado por Adel Saleh y Reinaldo Valenzuela, se desarrolló a través de mediciones experimentales en los laboratorios de AT&T en Nueva Jersey, Estados Unidos. La estructura del edificio estaba compuesta por vigas metálicas y vidrios, el interior estaba construido de madera con recubrimientos plásticos y cada cuarto estaba amueblado con típicos muebles de oficinas o de laboratorios electrónicos.

En este modelo, se analiza de forma detallada el efecto multitrayectoria, considerando que todas las multitrayectorias llegan en agrupamiento (clúster), en donde estas se generan por múltiples reflejos, los cuales se producen cuando la señal se refleja en objetos cercanos al transmisor o al receptor, y en cada clúster llegan varias multitrayectorias con diferentes fases (entre 0 y 2π), ángulos de llegada y potencias entre ellas, además determinan que la respuesta al impulso del canal si se analiza de forma estadística y natural es independiente a los estado de polarización de la antena, esto cuando no hay línea de vista directa (NLOS). La representación gráfica de esto se muestra en la figura 2.7. Determinar los parámetros para este modelo es muy simple, y no es necesario el

análisis estadístico. Finalmente, los resultados se analizan a través de una grafica de Poisson. Mostrando gráficamente el modelo Saleh-Valenzuela en la figura 2.7.

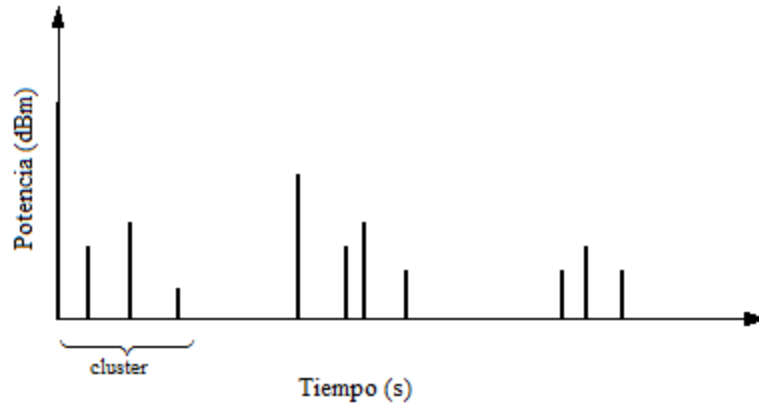


Figura 2.7. Representación de las señales multitrectorias en clúster.

El método propone dos formas de análisis, la primera de ellas, analiza la primera trayectoria que arriba al receptor en cada uno de los clúster y el segundo método permite analizar las demás trayectorias que llegan dentro del clúster.

La ecuación que describe el primer análisis, donde se observa la llegada de la primera trayectoria se representa por la siguiente expresión;

$$l > 0 \quad (2.26)$$

Donde T_1 es el tiempo de arribo de la primera trayectoria, del clúster l^{th} , L es la taza de llegada del clúster. Y la ecuación que describe la llegada de las demás trayectorias dentro del clúster se expresa de la siguiente manera:

$$p(T_{kl}|T_{(k-1)l}) = \lambda e^{-\lambda(T_{kl}-T_{(k-1)l})} \quad k > 0 \quad (2.27)$$

Donde t_{kl} es el retardo de la trayectoria k dentro del clúster l^{th} , relativo a la primera trayectoria que llega en un tiempo T_1 y l es la taza de llegada de cada una de las trayectorias [20].

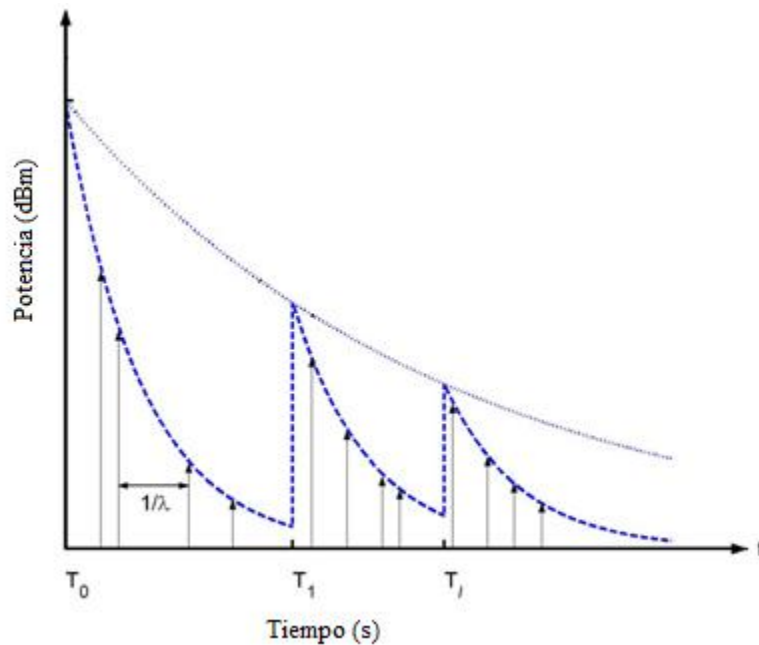


Figura 2.8. Representación de la llegada de las multitrayectorias.

2.4 Efectos del sombreado en interiores

Los modelos descritos en las secciones anteriores no toman en cuenta los desvanecimientos temporales de las señales provocados por el cuerpo humano u objetos que se encuentren en el entorno de propagación. Algunos experimentos han demostrado que un usuario con un terminal móvil moviéndose lentamente dentro de una oficina experimenta desvanecimientos Ricean o Rayleigh, dependiendo si existen condiciones de LOS o NLOS respectivamente. En el primer caso, el factor K Ricean toma valores de entre 2 -10 dB.

Nuestro propio cuerpo humano, así como el de otras personas que se encuentran en la vecindad del espacio de comunicación, influyen en la recepción de la señal. En general, ambos efectos provocan pérdidas en los niveles de la señal recibida además de fluctuaciones irregulares en los niveles de potencia en la recepción. Estas irregularidades son complejas de predecir o estimar debido a la dependencia que existe en la cantidad de personas u objetos que se encuentran cercanas al usuario.

Existen algunos trabajos que recomiendan que es importante considerar el efecto del sombreado en los modelos de propagación, particularmente el sombreado generado por el cuerpo humano. Para lo anterior establecen que estos modelos predicen la densidad probabilística de las pérdidas por el efecto del sombreado generado por el cuerpo humano. Como primer paso se determina la influencia de los rayos por métodos conocidos (trazado de rayos), para determinar los rayos que salieron del transmisor y que llegan al receptor considerando características de reflexión, difracción, penetración de paredes y suelos. Como segundo paso, se obtiene la probabilidad de densidad discreta del promedio de las pérdidas por propagación locales. Se tomará en cuenta la trayectoria que se produce cuando la persona está caminando en el cuarto, *walkways*.

Es un hecho de la existencia de varios *walkways*, como el movimiento de una persona de saliendo de la habitación. Con esto es necesario definir la probabilidad por sombreado para cada *walkway* que se tomará en cuenta, junto con la probabilidad de que la persona obstruya la trayectoria de la señal.

Se establecen las intersecciones entre los rayos calculados en el primer paso y los *walkways* y los puntos de sombreado. Para este caso se asumirá un evento de sombreado, que consiste en que una persona está atenuando el rayo, este evento ocurre en los puntos de sombreado con una probabilidad de que el punto de sombreado del *walkway* sea localizado. En este modelo se asume que las pérdidas propagación de un rayo están sujetas a múltiples eventos de sombreado, estos eventos se incrementan por la constante S_L (dB), que representa la pérdida adicional por sombreado. La ecuación (2.28) muestra el promedio local de las pérdidas;

$$L(S_1, S_2 \dots S_N) = -10 \log \sum_{i=1}^N 10^{-(L_i + L_{sh})/10} \quad (2.28)$$

Siguiendo con el procedimiento, es necesario calcular la desviación local de las pérdidas con la relación de fase por multitraectorias. Para lograr lo anterior, se asume que existe una variación distribuida para el promedio local de la relación de la fase entre las diferentes componentes de la longitud de onda.

2.5 Conclusiones

En este capítulo se presentaron las características principales de algunos modelos utilizados para la caracterización de entorno de propagación en interiores. Se puede concluir que cada uno de ellos considera distintos aspectos del entorno donde se desea realizar la caracterización. Lo anterior, definirá la complejidad de los cálculos que cada uno de los modelos tendrá que realizar para la estimación de los parámetros de propagación. Sin embargo, así como cada modelo requiere de múltiple información del entorno de propagación que se desea caracterizar, la tecnología juega un papel importante en el diseño e implementación de una red de comunicaciones inalámbricas. En el siguiente capítulo se presentará una breve introducción y descripción de la tecnología Zig-Bee que opera bajo el estándar IEEE 802.15.4. Ésta tecnología es la que se utilizó para la experimentación de este trabajo de investigación.

Capítulo 3

Características y operación básica de Zig-Bee

3.1 Introducción

Las tecnologías inalámbricas han adoptado con el paso del tiempo una manera más sencilla y cómoda de utilizar toda clase de dispositivos con el fin de mejorar el confort y las comunicaciones en general. Por ejemplo, Bluetooth es una tecnología de comunicaciones inalámbrica que ha venido a reemplazar, en entornos de corta distancia, a los sistemas de comunicación por infrarrojos, mientras que Wi-Fi (IEEE 802.11) se utiliza en entornos algo más amplios pero que, típicamente, no superan los 300 metros [27, 28, 30]. Además de estas dos tecnologías inalámbricas, existe otra denominada ZigBee. ZigBee es un estándar de comunicaciones inalámbricas diseñado por la ZigBee Alliance. No es una tecnología, sino un conjunto estandarizado de soluciones que pueden ser implementadas por cualquier fabricante. ZigBee está basado en el estándar IEEE 802.15.4 de redes inalámbricas de área personal (Wireless Personal Area Network, WPAN) y tiene como objetivo las aplicaciones que requieren comunicaciones seguras con baja tasa de envío de datos y maximización de la vida útil de sus baterías [26, 31]. ZigBee es promovida por la ZigBee Alliance, la cual, es una comunidad internacional de más de 100 compañías como Motorola, Mitsubishi, Philips, Samsung, Honeywell, Siemens, entre otras; cuyo objetivo es habilitar redes inalámbricas con capacidades de control y monitoreo que sean confiables, de bajo consumo energético y de bajo costo, que funcione vía radio y de modo bidireccional; todo basado en un estándar público global que permita a cualquier fabricante crear productos que sean compatibles entre ellos. Cuando se concibió este estándar, los primeros nombres que sonaron fueron: PURLnet, RF-Lite, Firefly, y HomeRF Lite, finalmente se escogió el término ZigBee. El nombre "ZigBee" se deriva de los patrones erráticos de comunicación que siguen las abejas entre las flores durante la recolección de polen. Esto evoca la

similitud que existe entre las conexiones de comunicación existentes en un entorno totalmente inalámbrico.

El valor de ZigBee radica en que permitirá impulsar el concepto de informática ubicua en oficinas, hogares y vehículos. Aunque proporciona menos velocidad que Bluetooth y actualmente no admite voz ni vídeo, permite un mayor alcance, por lo que puede cubrir muchos de los huecos dejados por las otras tecnologías inalámbricas, siempre que los requisitos de ancho de banda para la transmisión de datos no sean muy elevados. Tales características pueden tener especial interés en las pequeñas y medianas empresas, cuyas oficinas ocupan la planta de un edificio (dentro del rango de cobertura) y donde el intercambio de datos es moderado.

Así, la tecnología ZigBee está diseñada para aplicaciones como el seguimiento de productos (en competencia con RFID), monitorización médica de pacientes y cuidado personal, control de máquinas y herramientas y redes de sensores para el control industrial de plantas de proceso, así como para la automatización del hogar, control de energía y medioambiente [29]. Otras aplicaciones de interés son como interfaz para teléfonos móviles, control de accesos, juguetes interactivos, conexión de electrodomésticos y periféricos de ordenadores (compitiendo en este caso con USB y FireWire inalámbricos), monitorización de los parámetros de un vehículo, localización de objetos, telemetría, entre otros.

En ciertas condiciones y para determinadas aplicaciones puede ser una buena alternativa a otras tecnologías inalámbricas ya consolidadas en el mercado, como Wi-Fi y Bluetooth, aunque la falta del soporte del protocolo TCP/IP (Transport Control Protocol/Internet Protocol) no lo hace adecuado, por sí solo, para la interconexión de redes de comunicaciones IP. Por tanto, la introducción de ZigBee no acabará con otras tecnologías ya establecidas, sino que convivirá con ellas y encontrando sus propios nichos de aplicación [32].

El propósito de este capítulo es identificar las características básicas de operación de la tecnología Zig-Bee, incluyendo el modelo de referencia del estándar IEEE 802.15.4, topologías, los tipos de dispositivos y arquitectura.

3.2 Características Técnicas de ZigBee

La tecnología ZigBee está referenciada en el estándar IEEE 802.15.4 [26]. El estándar solo contempla las capas física (PHY) y de acceso al medio (MAC), en las modalidades CSMA/CA (Acceso Múltiple por Sensado de Portadora/ evitando Colisiones) y DSSS (Espectro Ensanchado de Secuencia Directa). Las capas superiores de red y seguridad las establecen la alianza ZigBee, mientras que la de aplicación corre a cargo de cada fabricante. La norma, basada en un protocolo de gran sencillez, provee un alto rendimiento en la transmisión de paquetes por radio y una alta inmunidad en ambientes con una baja relación señal/ruido, por lo que los dispositivos ZigBee son más robustos frente a interferencias que los que siguen los estándares Bluetooth o Wi-Fi [33]. Así, en entornos de propagación hostiles, como es la banda saturada de 2,4 GHz, ZigBee se comporta mucho mejor.

Con velocidades de 20, 40 y 250 kbit/s y un alcance en el rango de 10 a 75 m, ZigBee puede funcionar en las bandas ISM de 2,405-2,480 GHz (16 canales), 902-928 MHz (10 canales) y 868 MHz (1 canal), aunque la mayoría de fabricantes optan por la primera, ya que puede ser usada en todo el mundo, mientras que las dos últimas sólo se aplican en Estados Unidos y Europa, respectivamente.

Una red ZigBee, con topología en estrella, árbol o malla, puede escalar hasta 65.536 nodos, agrupados en subredes de hasta 255 nodos (Bluetooth solo admite 8 nodos), lo que la hace más que suficiente para cubrir cualquier necesidad. Teóricamente pueden existir hasta 16 000 redes diferentes en un mismo canal y cada red puede estar constituida por hasta 65 000 nodos, obviamente estos límites se ven truncados por algunas restricciones físicas (memoria disponible o ancho de banda) [24]. Esta característica ayuda a aumentar la confiabilidad de la comunicación, ya que entre más nodos existan dentro de una red, entonces, mayor número de rutas alternas existirá para garantizar que un paquete llegue a su destino. En cualquiera de las subredes siempre existe un único nodo coordinador central (que puede actuar como un hub o un router), encargado de la adquisición de datos y gestión de rutas entre dispositivos. Éstos pueden tener funcionalidad completa o reducida. En este caso durante la mayor parte del tiempo, mantienen el transceiver ZigBee dormido con objeto de reducir el consumo al mínimo, pudiendo pasar al estado activo en menos de 15

milisegundos [29]. El objetivo es que un sensor equipado con esta tecnología pueda ser alimentado con dos pilas AA un periodo de entre seis meses y dos años, aunque en la práctica se ha verificado que se podrán conseguir casi cinco años de duración en las aplicaciones de domótica y seguridad. Cada red ZigBee tiene un identificador de red único, lo que permita que coexistan varias redes en un mismo canal de comunicación sin ningún problema [32].

3.2.1 Estructura del estándar IEEE 802.15.4

Siguiendo el estándar del modelo de referencia OSI (Open Systems Interconnection), en la figura 3.1, aparece la estructura del modelo de referencia de la arquitectura ZigBee [26]. Las primeras dos capas, la física y la de acceso al medio MAC, son definidas por el estándar IEEE 802.15.4 y se explicarán en detalle en la siguiente sección. Las capas superiores son definidas por la Alianza ZigBee y corresponden a las capas de red y de aplicación las cuales contienen los perfiles del uso, ajustes de la seguridad y la mensajería. Los objetivos principales de la capa de red son permitir el correcto uso del subnivel MAC y ofrecer un interfaz adecuado para su uso por parte del nivel inmediatamente superior. Sus capacidades, incluyendo el ruteo, son las típicas de un nivel de red clásico. Por una parte, la entidad de datos crea y gestiona las unidades de datos del nivel de red a partir de la carga útil (payload) del nivel de aplicación y realiza el ruteo en base a la topología de la red en la que el dispositivo se encuentra. Por otra, las funciones de control del nivel controlan la configuración de nuevos dispositivos y el establecimiento de nuevas redes; puede decidir si un dispositivo colindante pertenece a la red e identifica nuevos routers y vecinos. El control puede detectar así mismo la presencia de receptores, lo que posibilita la comunicación directa y la sincronización a nivel MAC.

La siguiente capa es la de soporte a la aplicación formada por las sub-capas de Red, Seguridad y API, es el responsable de mantener el rol que el nodo juega en la red, filtrar paquetes a nivel de aplicación, mantener la relación de grupos y dispositivos con los que la aplicación interactúa y simplificar el envío de datos a los diferentes nodos de la red. La capa de Red y de soporte a la aplicación es definida por la ZigBee Alliance.

La capa de aplicación es el más alto definido por la especificación y, por tanto, la interfaz efectiva entre el nodo ZigBee y sus usuarios. En él se ubican la mayor parte de los componentes definidos por la especificación: tanto los objetos de dispositivo ZigBee (ZigBee device objects, ZDO) como sus procedimientos de control como los objetos de aplicación que se encuentran aquí.

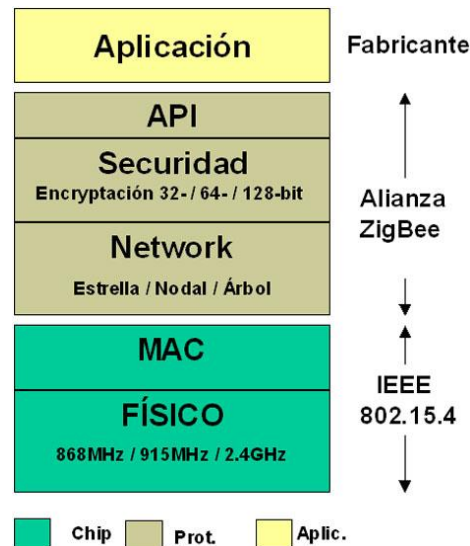


Figura 3.1. Modelo de referencia del estándar ZigBee

Cada capa se comunica con sus capas subyacentes a través de una interfase de datos y otra de control, las capas superiores solicitan servicios a las capas inferiores, y éstas reportan sus resultados a las superiores. Además de las capas mencionadas, a la arquitectura se integran otro par de módulos: módulo de seguridad, que es quien provee los servicios para cifrar y autenticar los paquetes, y el módulo de administración del dispositivo ZigBee, que es quien se encarga de administrar los recursos de red del dispositivo local, además de proporcionar a la aplicación funciones de administración remota de red.

3.2.2 Tipos de dispositivos

Se definen tres tipos diferentes de dispositivos [26] ZigBee según su papel en la red:

- Coordinador ZigBee (ZigBee coordinator, ZC). Es el tipo de dispositivo más completo. Puede actuar como director de una red en árbol así como servir de enlace a otras redes. Existe exactamente un coordinador por cada red, que es el nodo que la comienza en principio. Puede almacenar información sobre la red y actuar como su centro de confianza en la distribución de claves de cifrado.
- Router ZigBee (ZR). Además de ofrecer un nivel de aplicación para la ejecución de código de usuario, puede actuar como router interconectando dispositivos separados en la topología de la red.
- Dispositivo final (ZigBee end device, ZED). Posee la funcionalidad necesaria para comunicarse con su nodo padre (el coordinador o un router), pero no puede transmitir información destinada a otros dispositivos. De esta forma, este tipo de nodo puede estar dormido la mayor parte del tiempo, aumentando la vida media de sus baterías. Un ZED tiene requerimientos mínimos de memoria y es por tanto significativamente más barato.

En base a su funcionalidad puede plantearse una segunda clasificación de dispositivos:

- Dispositivo de funcionalidad completa (FFD): es capaz de recibir mensajes en formato del estándar 802.15.4. Gracias a la memoria adicional y a la capacidad de conmutar, puede funcionar como coordinador o router o puede ser usado en dispositivos de red que actúen de interface con los usuarios.
- Dispositivo de funcionalidad reducida (RFD): tiene capacidad y funcionalidad limitadas (especificada en el estándar) con el objetivo de conseguir un bajo costo y una gran simplicidad. Básicamente, son los sensores/actuadores de la red.

Un nodo ZigBee (tanto activo como pasivo) reduce su consumo gracias a que puede permanecer dormido la mayor parte del tiempo (incluso muchos días seguidos). Cuando se

requiere su uso, el nodo ZigBee es capaz de despertar en un tiempo ínfimo, para volverse a dormir cuando deje de ser requerido. Un nodo cualquiera despierta en aproximadamente 15 ms. Además de este tiempo, se muestran otras medidas de tiempo de funciones comunes:

- Nueva enumeración de los nodos esclavo (por parte del coordinador): aproximadamente 30 ms y Acceso al canal entre un nodo activo y uno pasivo: aproximadamente 15 ms [29,32].

3.3 Características de la capa Física IEEE 802.15.4

El estándar IEEE 802.15.4, define un total de 27 canales, distribuidos en las tres bandas de frecuencia, En la Tabla 3 se presentan las características físicas principales del estándar. La banda de 868 MHz considera un solo canal de 600 Khz de ancho de banda (entre los 868 y 868.6 MHz); se tienen diez canales en la banda de frecuencia de los 915 MHz, distribuidos entre las frecuencias de 902.0 y 928.0 MHz. Sin embargo, es muy poco probable que alguna red utilice los 11 canales, pero debido a la cercanía de las frecuencias, se puede utilizar el mismo hardware en las redes, con lo cual se reduce el costo de manufactura. La frecuencia de 2.4 Ghz considera hasta 16 canales (ver figura 3.2) entre los 2.4 GHz y 2.4835 GHz con un espacio entre canales de 5 Mhz, de esta manera se garantiza el filtrado de información en los dispositivos transmisor y receptor.

Tabla 3.1. Propiedades Físicas del estándar IEEE 802.15.4

Parámetro	Característica
Bandas de frecuencia y rangos de transmisión de datos	868 MHz: 20 Kb/s 915 MHz: 40 Kb/s 2.4 GHz: 250 Kb/s
Latencia	por debajo de 15 ms
Cantidad de Canales por frecuencia de operación	868 MHz: 1 canal 915 MHz: 10 canales 2.4 GHz: 16 canales
Modos de direccionamiento	Chips con 64 bits de direccionamiento
Técnica de Acceso al Medio (MAC)	CSMA-CA
Seguridad	128 AES
Nodos en la Red	Hasta 2^{64} dispositivos
Rango de temperatura	Desde -40° C hasta 85° C

Los dispositivos ZigBee incluyen ciertas funciones de búsqueda de canal, las cuales están dentro de la capa MAC, por lo cual se puede utilizar para buscar dentro de una lista de canales, la señal guía, esto debido a que en entornos interiores pueden existir varios dispositivos los cuales trabajen en el mismo rango de frecuencia, haciendo que se puedan producir interferencias o desvanecimientos de señal, por lo cual es recomendable cambiar el canal de operación.

Las especificaciones de sensibilidad del estándar ZigBee indican que para la banda de operación de 2.4 GHz una potencia aceptable es de -85 dBm y de -92 dBm para las frecuencias de 868/915 MHz [25]. Con estos valores de sensibilidad se garantiza una comunicación eficiente, independientemente de las características físicas de cada dispositivo. Cada dispositivo es capaz de transmitir con una potencia mínima de 1 mW, sin embargo dependiendo los requerimientos del usuario esta potencia de transmisión puede ser

mayor o menor, para aprovechar al máximo la energía. Con una potencia de 1 mW, el rango de cobertura puede ser de entre 10 y 20 metros.

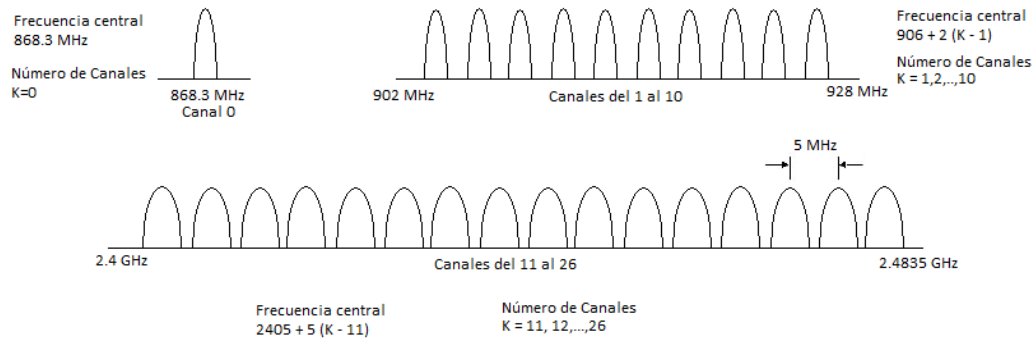


Figura 3.2. Estructura de los canales ZigBee

3.4 Capa de enlace de datos

La capa de enlace de datos se subdivide en la subcapa de Control al Acceso Medio (MAC por sus siglas en inglés Medium Access Control), y la subcapa de Control de Enlace Lógico (LLC por sus siglas en inglés Logical Link Control).

La sub-capa MAC se encarga principalmente de la asociación/disociación, reconocimientos de entrega de tramas (ACK), mecanismos de acceso al canal, validación de trama, control de garantía de ranuras de tiempo (Slot time), control de guías (Beacons) y el barrido de canal. Brindando dos tipos de servicio hacia las capas superiores, los cuales tienen acceso a través de dos Puntos de Acceso a Servicios (SAPs).

Caracterizándose por tener una baja complejidad, el administrador del servicio MAC tiene 26 primitivas, que si se compara con otras tecnologías es muy simple (por ejemplo el estándar IEEE 802.15.1 Bluetooth, considera 131 primitivas), emplea un total de 64 bits para direccionamiento físico, lo que permite tener hasta 2^{64} dispositivos en una red.

3.4.1 Empaquetamiento y direccionamiento

En ZigBee, el empaquetamiento se realiza en cuatro tipos diferentes de paquetes básicos, los cuales son: datos, ACK, MAC y baliza. En las figuras 3.3, 3.4, 3.5 y 3.6 se muestran las tramas de los cuatro tipos de paquetes básicos respectivamente.

El paquete de datos tiene una carga de datos de hasta 104 bytes. La trama esta numerada para asegurar que todos los paquetes llegan a su destino. Esta estructura aumenta la fiabilidad en condiciones complicadas de transmisión. El preámbulo de secuencia tiene un tamaño de 32 bits, para el encabezado se utilizan 7 bits para especificar la longitud de la carga de datos (en bytes). La longitud del paquete varía desde 0-127 bytes, y para entornos interiores de entre los 30 y 60 bytes. Si se considera que se transmite a una frecuencia de 2.4 GHz la duración máxima de paquetes es de 4.25 ms, de 26.6 ms para la frecuencia de 915 MHz y de 53.2 ms para la frecuencia de 868 MHz, las características de los demás campos se pueden consultar en la referencia [26].

La estructura de los paquetes ACK, llamada también paquete de reconocimiento, es dónde se realiza una realimentación desde el receptor al emisor, de esta manera se confirma que el paquete se ha recibido sin errores. Se puede incluir un tiempo de silencio entre tramas, para enviar un pequeño paquete después de la transmisión de cada paquete.

El paquete MAC, se utiliza para el control remoto y la configuración de dispositivos/nodos. Una red centralizada utiliza este tipo de paquetes para configurar la red a distancia. El paquete baliza se encarga de “despertar” los dispositivos que “escuchan” y luego vuelven a “dormirse” si no reciben nada más. Estos paquetes son importantes para mantener todos los dispositivos y los nodos sincronizados, sin tener que gastar una gran cantidad de batería estando todo el tiempo encendidos.

Por otra parte, el direccionamiento es, a su vez, parte del nivel de aplicación. Un nodo está formado por un transceptor de radio compatible con el estándar 802.15.4 dónde se implementan dos mecanismos de acceso al canal y una o más descripciones de dispositivo (colecciones de atributos que pueden consultarse o asignarse, o se pueden

monitorizar por medio de eventos). El transceptor es la base del direccionamiento, mientras que los dispositivos dentro de un nodo se identifican por medio de un punto terminal (endpoint) numerado entre 1 y 240.

Los dispositivos se direccionan empleando 64-bits y un direccionamiento corto opcional de 16 bits. El campo de dirección incluido en MAC puede contener información de direccionamiento de ambos orígenes y destinos (necesarios para operar punto a punto). Este doble direccionamiento es usado para prevenir un fallo dentro de la red.

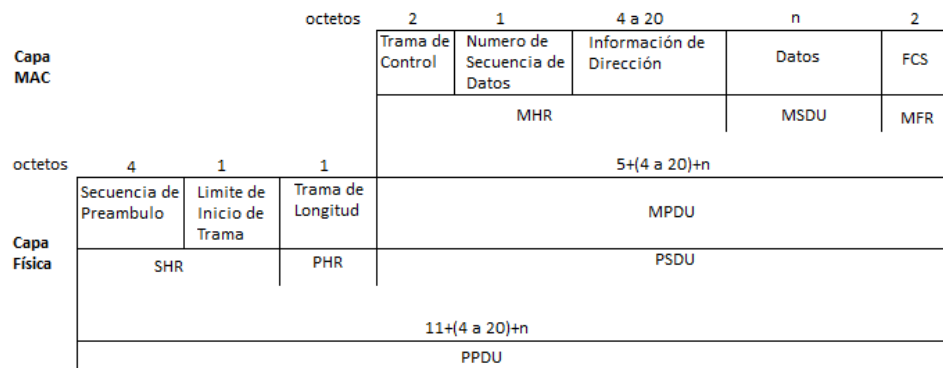


Figura 3.3. Formato de la trama de datos

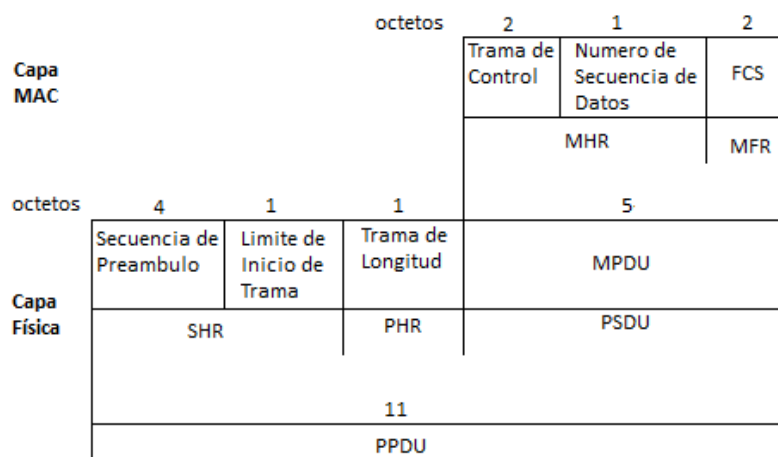


Figura 3.4. Formato de trama ACK

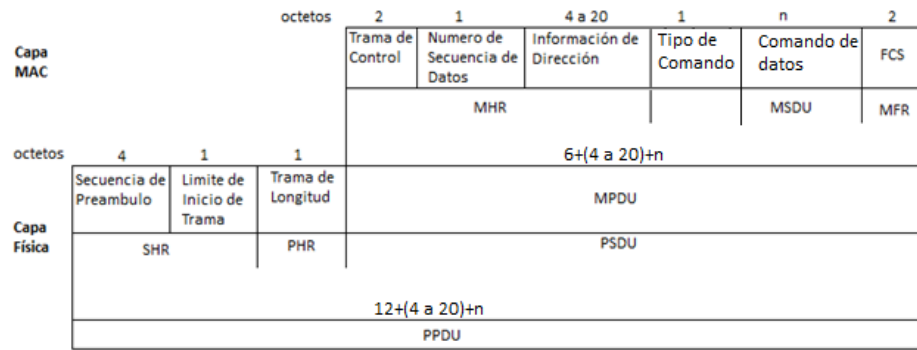


Figura 3.5. Formato de trama MAC

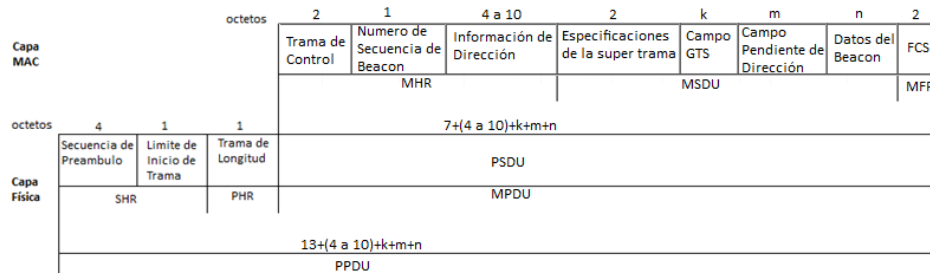


Figura 3.6. Formato de trama Baliza

La trama baliza es muy importante para ZigBee, ya que gracias a esta característica la tecnología ZigBee se vuelve la más ahorradora de energía. Esta trama le permite a los dispositivos escuchar la red y en caso de que no sea necesario transmitir información, los dispositivos inician un estado de letargo (Stand by. Con esto, es posible que todos los nodos se puedan sincronizar sin que requieran un gran consumo de energía, escuchando durante largos periodos de tiempo, sin importar el tipo de topología de la red.

En este tipo de tramas contiene estructuras llamadas súper tramas. Éstas, tienen como función proporcionar grandes estados de latencia, debido a que muchas aplicaciones requieren grandes anchos de banda, los cuales se necesitan para lograr grandes estados latentes, para poder obtener bajos consumos de energía y esto se logra gracias a las súper tramas, las cuales podemos ver en la figura 3.7.

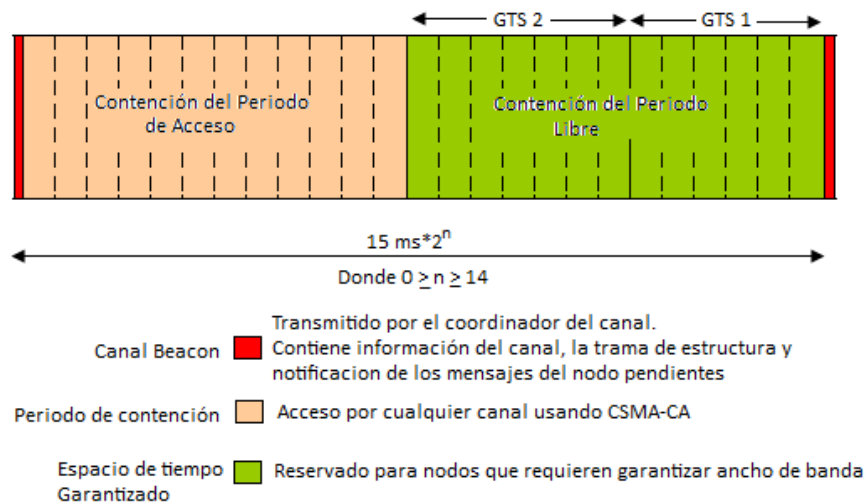


Figura 3.7. Formato general de la estructura de súper trama

Aquí se denomina un coordinador de la red, el cual transmite súper tramas de guía en intervalos definidos. Estos intervalos pueden variar en su longitud, desde 15 ms hasta 245 s, dependiendo de la cantidad de transmisión que se requiera transmitir. El tiempo entre cada intervalo se divide en 16 tiempos de espera, los cuales son independientes a la duración de cada súper trama. Así, en cualquier espacio de tiempo, el dispositivo transmisor puede enviar información, siempre y cuando sea antes que llegue la siguiente súper trama guía. Estos espacios de tiempo, pueden ser asignados por el dispositivo coordinador, cada vez que algún dispositivo requiera un determinado ancho de banda permanente o que requiera transmisiones de baja latencia.

3.4.2 Acceso al canal

Los dos mecanismos de acceso al canal que se implementan en ZigBee corresponden para redes “con balizas” y “sin balizas”. Para una red “sin balizas”, un estándar ALOHA CSMA-CA envía reconocimientos positivos para paquetes recibidos correctamente. En esta red, cada dispositivo es autónomo, lo que significa que cada nodo puede iniciar una conversación, en la cual los otros pueden interferir. A veces, puede ocurrir que el dispositivo destino puede no oír la petición, o que el canal esté ocupado.

Este sistema se usa típicamente en los sistemas de seguridad, en los cuales sus dispositivos (sensores, detectores de movimiento o de rotura de cristales), duermen prácticamente todo el tiempo (el 99,999%). Para que se les tenga en cuenta, estos elementos se "despiertan" de forma regular para anunciar que siguen en la red. Cuando se produce un evento, el sensor "despierta" instantáneamente y transmite la alarma correspondiente. Es en ese momento cuando el coordinador de red, recibe el mensaje enviado por el sensor, y activa la alarma correspondiente. En este caso, el coordinador de red se alimenta de la red principal durante todo el tiempo.

En cambio, en una red "con balizas", es un mecanismo de control del consumo de potencia en la red. Permite a todos los dispositivos saber cuándo pueden transmitir. En este modelo, los dos caminos de la red tienen un distribuidor que se encarga de controlar el canal y dirigir las transmisiones. Las balizas que dan nombre a este tipo de entorno, se usan para poder sincronizar todos los dispositivos que conforman la red, identificando la red domótica, y describiendo la estructura de la "súper trama". Los intervalos de las balizas son asignados por el coordinador de red para controlar el acceso al canal y pueden variar desde los 15.38 ms hasta los 4 minutos. Esta estructura garantiza el ancho de banda dedicado y bajo consumo. Este modo es más recomendable cuando el coordinador de red trabaja con una batería. Los dispositivos que conforman la red, escuchan a dicho coordinador durante el "balizamiento" (envío de mensajes a todos los dispositivos -broadcast-, entre 0,015 y 252 segundos). Un dispositivo que quiera intervenir, lo primero que tendrá que hacer es registrarse con el coordinador, y es entonces cuando detecta si hay mensajes para él. En el caso de que no haya mensajes, este dispositivo vuelve a "dormir", y se despierta de acuerdo a un horario que ha establecido previamente el coordinador. En cuanto el coordinador termina el "balizamiento", vuelve a "dormirse".

3.5 Topologías de red

En ZigBee existen tres tipos de topologías [9, 12, 24]: estrella, árbol, y red en malla (mesh network), las cuales pueden observarse en la figura 3.8. Siempre hay un nodo de red que asume el papel de coordinador central encargado de centralizar la adquisición y las rutas de comunicación entre dispositivos. Además, si se aplica el concepto de Mesh

Network, pueden existir coordinadores o routers, alimentados permanentemente en espera de recibir/repetir las tramas de los dispositivos o sensores. Ambos dispositivos son del tipo FFD (Full Functionality Device), debido a que exigen empotrar la mayoría de primitivas definidas por el modelo de referencia ZigBee.

En la configuración en estrella, uno de los dispositivos tipo FFD asume el rol de coordinador de red y es responsable de inicializar y mantener los dispositivos en la red. Todos los demás dispositivos zigbee, conocidos con el nombre de dispositivos finales, hablan directamente con el coordinador.

Para la topología punto a punto, existe un solo FFD Coordinador. A diferencia con la topología estrella, cualquier dispositivo puede comunicarse con otro siempre y cuando estén en el mismo rango de alcance circundante. Las aplicaciones orientadas para el monitoreo y control de procesos industriales, redes de sensores inalámbricos, entre otros, son ampliamente usados por estas redes. Proveen confiabilidad en el enrutamiento de datos (multipath routing).

Los dispositivos que harán la función de sensores, o mandos a distancia serán de funcionalidad reducida (RFD, Reduced Functionality Device), y serán alimentados por baterías o pilas.

Sin lugar a dudas, una de las mayores aportaciones del ZigBee y el que mayor interés está despertando a las empresas desarrolladoras de productos, es el concepto de red nodal o mesh network por el que cualquier dispositivo ZigBee puede conectarse con otro dispositivo usando a varios de sus compañeros como repetidores. A este se le conoce como enrutado “multi-salto”, primero hace llegar la información al nodo ZigBee vecino, el cual puede además ser coordinador de la red, para así llegar al nodo destino, pasando por todos los que sean necesarios. De esta manera cualquier nodo ZigBee puede hacer llegar los datos a cualquier parte de la red inalámbrica siempre y cuando todos los dispositivos tengan un vecino dentro de su rango de cobertura.

La aplicación del concepto de Mesh Networks, hará viable muchas aplicaciones de domótica vía radio en viviendas construidas [27, 31], allí donde las tecnologías radio de generaciones anteriores estaban limitadas en cuanto a la cobertura o alcance entre

dispositivos. Gracias a esto la instalación y puesta en marcha de dispositivos de domótica en cualquier vivienda será una tarea muy sencilla e independiente de la tipología y tamaño de esta.

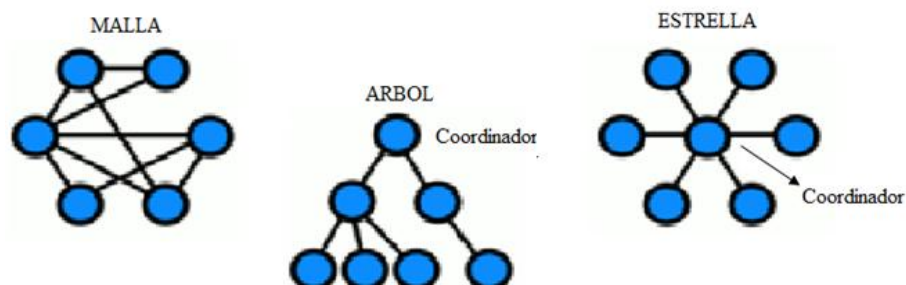


Figura 3.8. Tipos de topología de una red ZigBee

3.6 Áreas de aplicación

El mercado para las redes ZigBee comprende una amplia variedad de aplicaciones. En la actualidad un gran número de las compañías que forman parte de la ZigBee Alliance se encuentran desarrollando productos que van desde electrodomésticos hasta teléfonos celulares, impulsando el área que más les interesa.

Hay que tener en cuenta que ZigBee está diseñado para aplicaciones que transmiten unos cuantos bytes esporádicamente, que es el caso de una aplicación para automatizar el hogar (domótica) [27, 28]. Al usar esta tecnología no habría la necesidad de cablear los interruptores, los cuales podrían ser cambiados de un lugar a otro con plena libertad, lo que hará posible, prender o apagar las luces de tu casa a través de Internet o utilizando tu teléfono celular en cualquier momento.

Una de las áreas de aplicación que ha tomado fuerza, es la de los sistemas de medición avanzada, medidores de agua, luz y gas que forman parte de una red con otros dispositivos como displays ubicados dentro de las casas, que pueden monitorear el consumo de energía y no sólo eso, sino que también pueden interactuar con electrodomésticos o cualquier otro sistema eléctrico como bombas de agua o calefacción, con la finalidad de aprovechar mejor la energía. ZigBee goza de un importante respaldo

para la gestión energética y para las soluciones de consumo eficiente por parte de la industria de los servicios públicos; y por parte de los patrocinadores de las redes energéticas inteligentes en varios países.

Otra área de aplicación prometedora es el rastreo de bienes, también está en la lista a identificación vehicular, nodos ubicados en vehículos que permiten identificar al vehículo a distancia y descargar información que ha recopilado por un periodo de tiempo determinado, monitorización médica de pacientes y cuidado personal, control de máquinas y herramientas y redes de sensores para el control industrial de plantas de proceso. Este tipo de escenarios se encuentran al alcance de la tecnología actual. Las anteriores son sólo algunas de las múltiples aplicaciones que se le pueden dar a las redes en cuestión.

3.7 Conclusiones

En la actualidad existen una gran cantidad de estándares que permiten todo tipo de aplicaciones en el ámbito de las comunicaciones inalámbricas, las mismas que permiten grandes tasas de transferencias de audio, video, o datos. Sin embargo, estos estándares no son adecuados para situaciones en las que se requiere de un bajo consumo de energía, para ello se ha creado ZigBee. La principal aplicación de ZigBee son los sistemas para redes domóticas, pues ha sido creado para cubrir las necesidades del mercado en este campo, sin embargo, ZigBee tiene amplias capacidades de desarrollo que le permite ser utilizado en múltiples aplicaciones. A pesar de lo prometedor que es ZigBee, existen otras empresas que están desarrollando nuevas tecnologías, por ejemplo Nokia, que junto con algunos proveedores de tecnología han lanzado **Wibree**, una versión reducida de Bluetooth, más barata, orientada a pequeños dispositivos y con autonomía de varios años.

En el siguiente capítulo se describirán los experimentos realizados durante esta investigación para la caracterización de diversos entornos de propagación utilizando tecnología ZigBee.

Capítulo 4

Experimentos

4.1 Características principales

Para realizar la parte experimental de la tesis, iniciaremos por describir los equipos que se utilizaron; los dispositivos transmisor (Tx) y receptor (Rx) que se utilizaron fueron dos equipos MC1321x, que trabajan con el estándar IEEE 802.15.4 o ZigBee. En todas las mediciones los dispositivos se encontraban sobre mesas de plástico con armazón metálico, como se muestra en la figura 4.1. Donde las dimensiones físicas de las mesas eran de 1.22 metros de largo, 0.75 metros de ancho y 0.75 metros de alto. Ambos dispositivos se colocaron en el centro de las mesas y el receptor fue conectado a su vez a una laptop, vía USB para poder coleccionar los datos obtenidos de la medición.

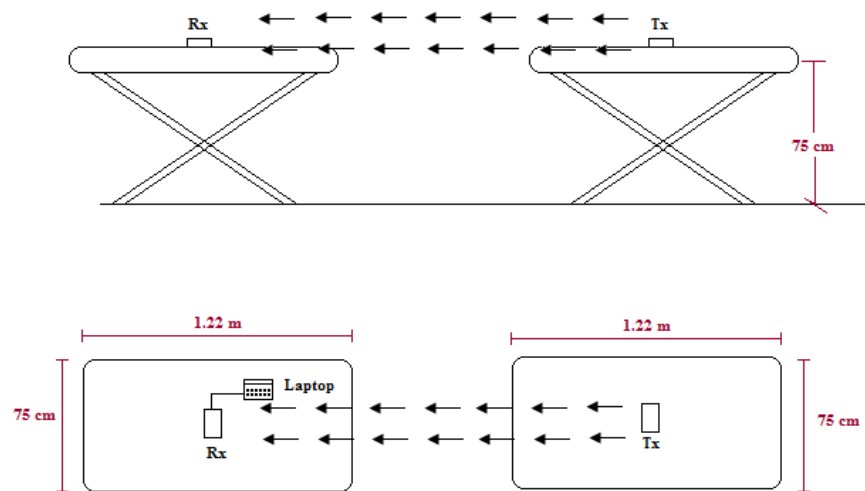


Figura 4.1. Acomodo de los dispositivos en las mesas

El sistema opera en la frecuencia libre de 2.4 GHz, en donde ambos dispositivos (Tx y Rx) fueron programados para que trabajen en el canal 1, el cual trabaja en la frecuencia central de 2.405 GHz, enviando 3000 paquetes con una longitud de 18 bytes por

paquete, con un bit rate de 250 Kbps, enviando a una razón de 20 paquetes/s y una potencia de transmisión de 0 dBm, teniendo un ruido de suelo de -70 dBm.

El procedimiento para la recolección de datos para todos los experimentos consistió en poner el transmisor en el lugar central de la habitación o en alguno de los extremos (dependiendo el tipo de medición que se requiera, el cual se explicará más adelante) y el receptor se movió alrededor del transmisor, en los puntos de interés según el entorno donde se hizo la medición.

De los 3000 paquetes que se enviaban por medición, se almacenaban las potencias recibidas y posteriormente se sacaba la media y el promedio del total de los paquetes y esos valores se graficaban para su análisis. La primera métrica que se utilizaba era el indicador de potencia recibida (RSSI por sus siglas en ingles Received Signal Strength Indicator), el cual es la potencia con la cual la señal llega al receptor. La segunda métrica es la relación de paquetes erróneos (PER por sus siglas en ingles Packet Error Rate), aquí el receptor hace un conteo de paquetes que recibe de forma correcta y los compara con el total de paquetes que fueron enviados, dándonos una relación de paquetes recibidos correctamente, que como se mencionó anteriormente en nuestro caso el total de paquetes en todo momento fueron 3000 y al igual que en el caso de del RSSI, se saca un porcentaje total de la cantidad de paquetes recibidos correctamente y se grafica el resultado para poder hacer su análisis correspondiente.

Una vez explicadas las características principales del proceso de medición y colección de datos se pasará a explicar cada uno de los escenarios en donde se realizaron los experimentos.

4.2 Caracterización espacial

Las mediciones fueron realizadas en dos entornos diferentes, el primero de ellos fue en entornos interiores, este entorno es dentro de algún lugar, como lo son escuelas, casas, oficinas, etc. En estos entornos según [1], se tienen rápidas fluctuaciones de la señal recibida en distancias cortas, en estos entornos tendremos predominantemente los desvanecimientos multitrayectoria y sombreado, dado que los objetos, dispersores y otras

tecnologías que actúan como interferentes están a distancias muy cortas. El segundo entorno, es el entorno en exteriores, este entorno es en cualquier lugar que este en un espacio abierto, como lo son los campos de cultivos o deportivos, bosques, etc. Donde los dispersores y dispositivos interferentes afectan muy poco a la comunicación, en este entorno las pérdidas por distancia son las más predominantes.

4.2.1 Entornos interiores

Se realizaron varios experimentos en entornos interiores, el primero que se describirá será el entorno ideal, el cual se realizó en una Jaula de Faraday, en la cual teníamos un entorno en el cual no teníamos interferencia de ningún otro dispositivo inalámbrico, además no existían obstáculos o interferentes de ningún tipo. Considerando que en todo momento se tenía línea de vista directa (LOS), entre receptor y transmisor. Este entorno, era un cuarto de 4.5 metros de largo por 4.5 metros de ancho, aquí se realizaron varios experimentos, los primeros, como se muestra en la figura 4.2, se colocó el transmisor en una de las esquinas del cuarto y el receptor se movió de forma vertical, horizontal y diagonal del transmisor, cada 0.5 metros por medición.

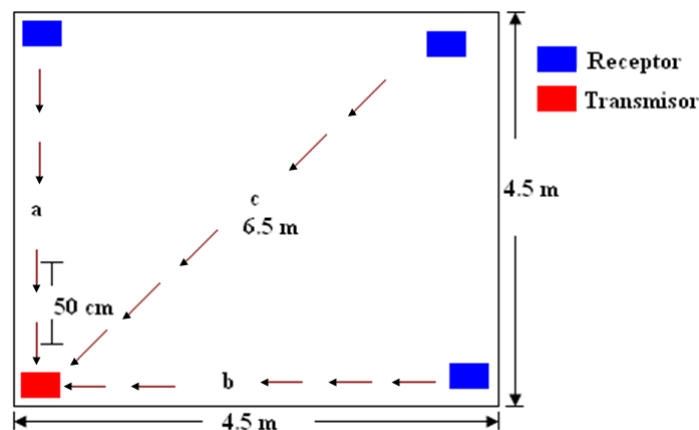


Figura 4.2. Acomodo de los dispositivos en el entorno ideal con LOS

Gracias a este entorno, se pudo tener una referencia del comportamiento de los dispositivos, realizando así una caracterización de los mismos, así estas mediciones se

utilizaron de referencia para algunos experimentos realizados en entornos interiores, aunque la gran limitante que se tiene es que las dimensiones del cuarto eran muy pequeñas por lo cual solo se pudo tener muestras en distancias muy cortas, siendo limitando el análisis del comportamiento de los dispositivos y por lo tanto no se puede usar como referencia para entornos con mayores distancias, independientemente que sean interiores o exteriores.

Otro entorno que en el que se realizaron los experimentos, fue una casa-habitación, la cual tiene dimensiones de 6.26 metros de largo por 4.83 metros de ancho, en donde al igual que en el entorno ideal, se realizaron varios experimentos, en uno de ellos el transmisor fue colocado al centro de la casa-habitación y el receptor fue colocado alrededor del transmisor a una distancia de 0.5 metros cuadrados, este experimento se ilustra en la figura 4.3. En este entorno, se tienen cosas habituales de una casa, dependiendo el cuarto, como lo son cama, televisor, estufa, comedor, etc. Además de considerar que pueden existir otras tecnologías que pueden interferir en la señal, como lo son redes de internet inalámbricas, dispositivos de comunicación como celulares, etc. Mencionando que en este entorno existieron mediciones con LOS pero de igual manera hubo mediciones donde no se tenía línea de vista directa (NLOS), entre los dispositivos.

El principal propósito de este experimento es poder determinar el comportamiento de una señal dentro de un entorno habitual como es una casa. Debido a que la mayoría de las personas pasa una gran cantidad de su tiempo en sus hogares, poder determinar en una casa con estas características, el número de dispositivos receptores hacen falta para poder garantizar una buena comunicación independientemente del lugar de la casa donde se encuentren las personas, así como ver el rendimiento de los dispositivos en esta clase de entornos.

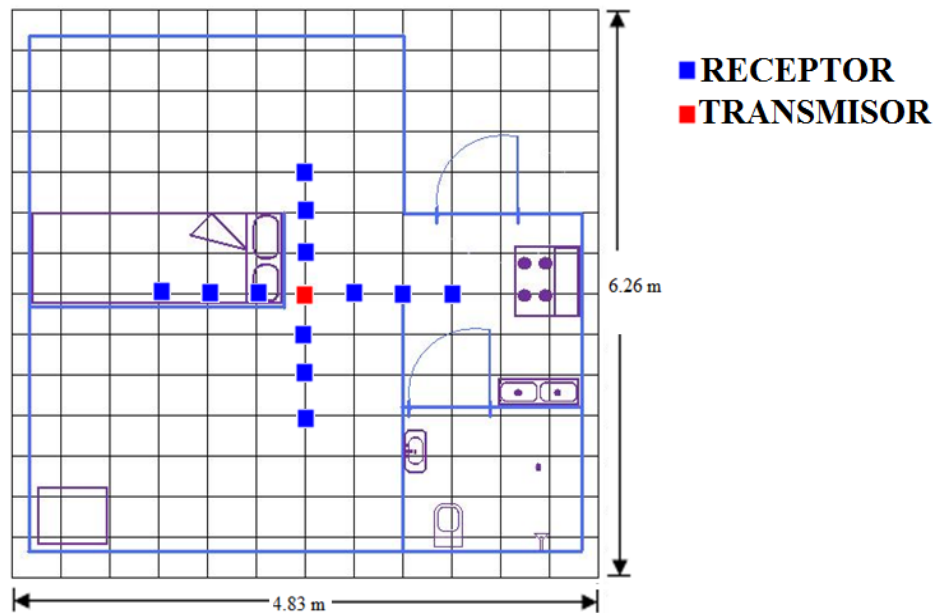


Figura 4.3. Acomodo de los dispositivos en una casa-habitación con LOS

Otro de los experimentos realizados en este entorno, fue el hacer la medición fuera en la parte de cochera de la casa, se colocó el transmisor en el centro de la casa pero el receptor fue colocado en todo el tramo de la cochera, teniendo como diferencia que el receptor se movía cada metro por medición, esto se ilustra en la figura 4.4. En este caso, se tuvo un área de cobertura de 10 metros de ancho por 5 metros de largo. El objetivo principal fue determinar si se podía tener una cobertura con un mismo dispositivo transmisor aunque la persona sensada estuviera realizando alguna actividad fuera de su casa, como lo puede ser, lavar el carro,

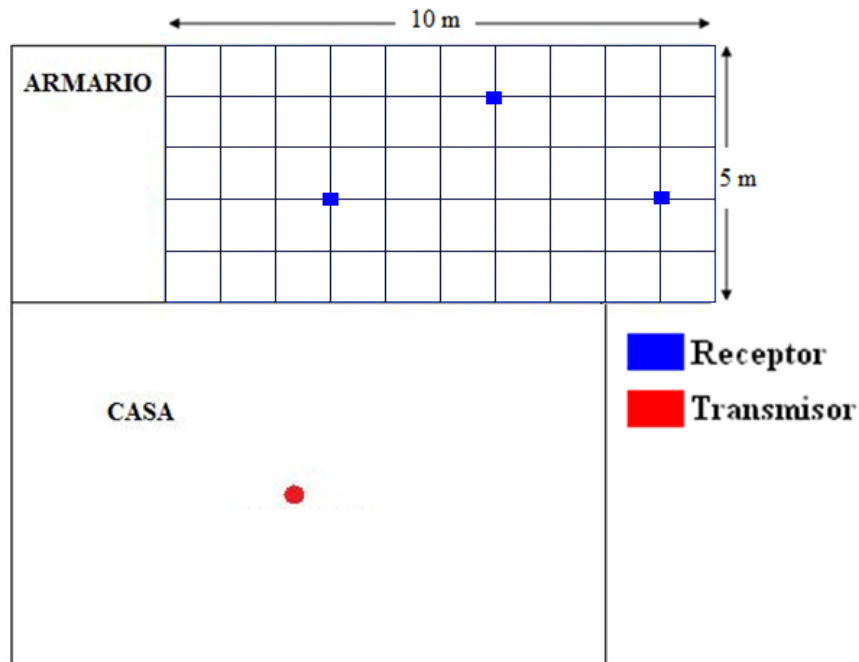


Figura 4.4. Acomodo de los dispositivos en la cochera de una casa-habitación

Con esto terminamos los entornos interiores y pasamos a la caracterización en entornos exteriores.

4.2.2 Entornos exteriores

Después, se hicieron experimentos en un entorno exterior, donde al igual que en la caracterización en interiores, se tomaron en cuenta dos escenarios, uno fue la explanada principal de la Universidad Autónoma de Baja California campus ingeniería de Mexicali, donde solamente se realizó un experimento, en el cual, se determina la cobertura máxima de los dispositivos ZigBee, en este experimento se colocó el transmisor en un lado de la explanada y el receptor fue moviéndose en línea recta de metro en metro hasta llegar a la distancia máxima donde se tuviera una comunicación eficiente. Que en este caso fue una distancia máxima de 70 metros, donde en todo momento existió LOS. Mostrando de forma grafica en la figura 4.5.

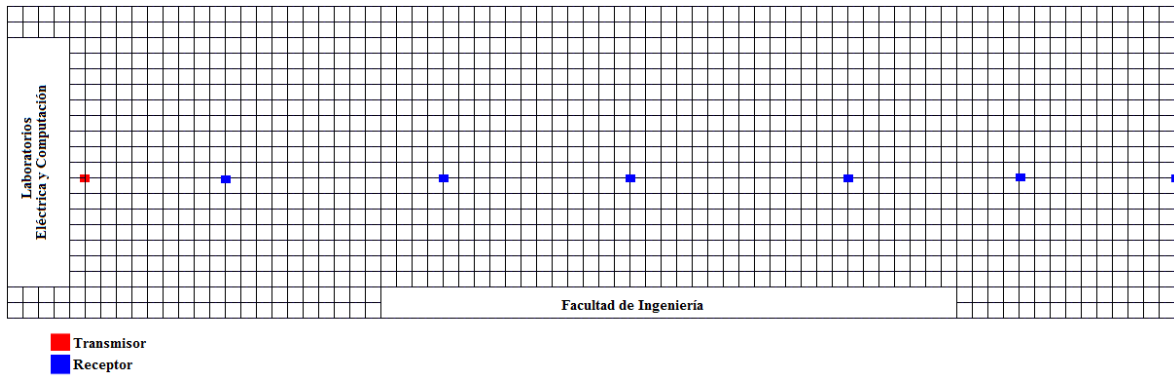


Figura 4.5. Acomodo de los dispositivos en la explanada de la Universidad Autónoma de Baja California campus de ingeniería en Mexicali, experimento de distancia con LOS

El otro escenario fue en la Facultad de Ingeniería campus Mexicali, aquí se realizaron varios experimentos en donde el primero de ellos se colocó el transmisor en una de las orillas de la explanada y el receptor se fue moviendo de metro en metro en línea recta, hasta llegar a la distancia máxima de la explanada que en este caso fueron 56 metros. Donde se tenía LOS entre los dispositivos. En este entorno se tienen las características típicas de un ambiente escolar, donde existen alumnos, bancas, salones de clases, etc. Al igual que en casos anteriores, la presencia de otras tecnologías como Wi-Fi y red de celular, son habituales en el entorno. Este experimento se ilustra en la figura 4.6.

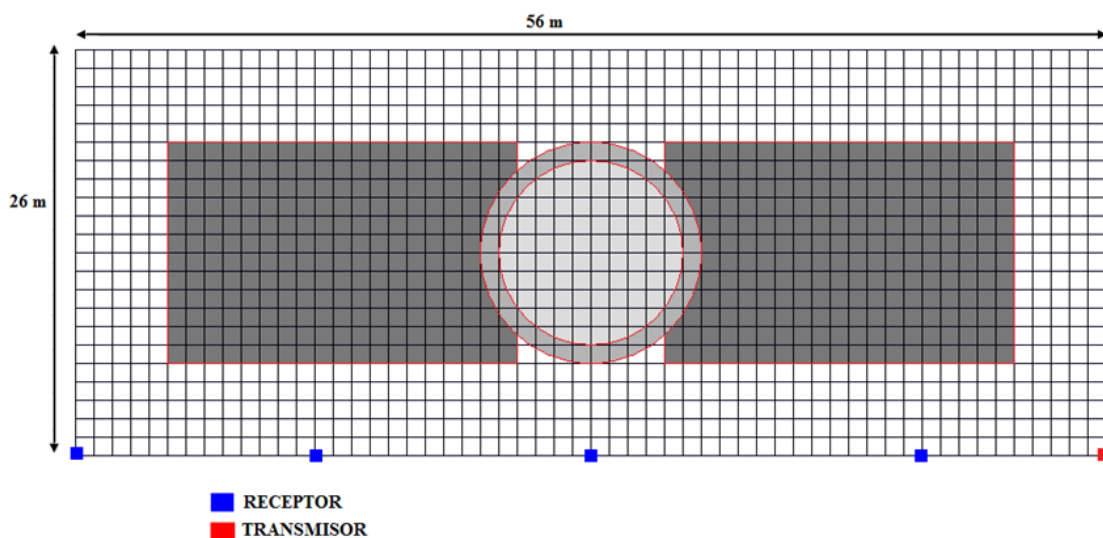


Figura 4.6. Acomodo de los dispositivos en la explanada de la facultad de ingeniería campus Mexicali, experimento de distancia con LOS

Fig.

Como segunda parte de este mismo experimento, se realizó el mismo experimento con la diferencia de que se tenía NLOS entre los dispositivos, cubriendo una distancia de 50 metros. El cual se muestra en la figura 4.7.

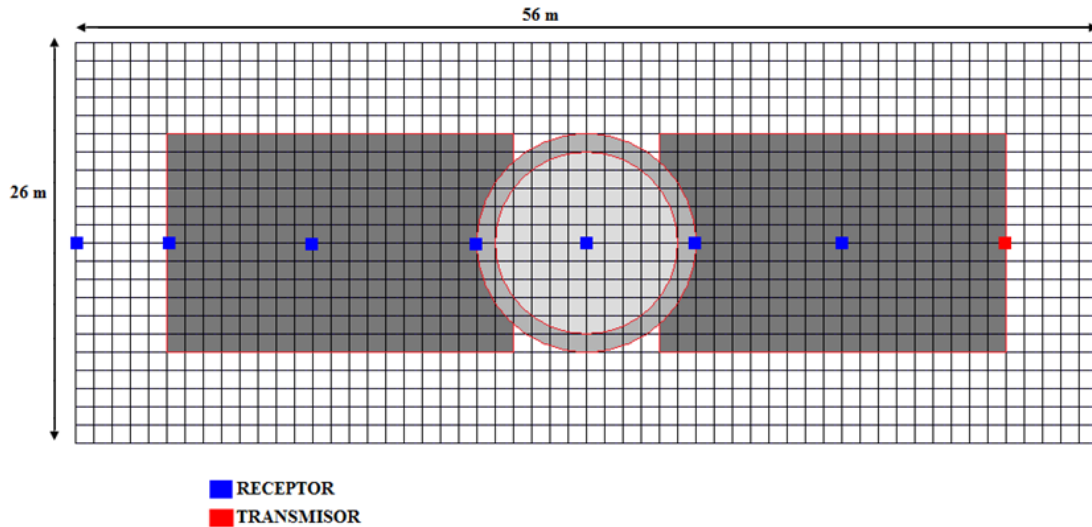


Figura 4.7. Acomodo de los dispositivos en la explanada de la facultad de ingeniería campus Mexicali, experimento de distancia con NLOS

El objetivo en este par de experimentos es poder determinar la distancia máxima de cobertura de los dispositivos de comunicación inalámbrica, tanto con LOS como con NLOS, en un entorno interior.

Posteriormente otro de los objetivos es poder determinar un patrón de radiación en este entorno, por lo cual el siguiente experimento consistió en poner el transmisor al centro de la explanada, después se trazaron círculos alrededor del transmisor con una distancia de 1 metro entre círculos, hasta llegar al círculo máximo que fue de 26 metros de diámetro; sobre los círculos cada 15 grados se colocó el receptor para realizar una medición. En este caso todas las mediciones tuvieron LOS entre ambos dispositivos. Este experimento se ilustra en la figura 4.8.

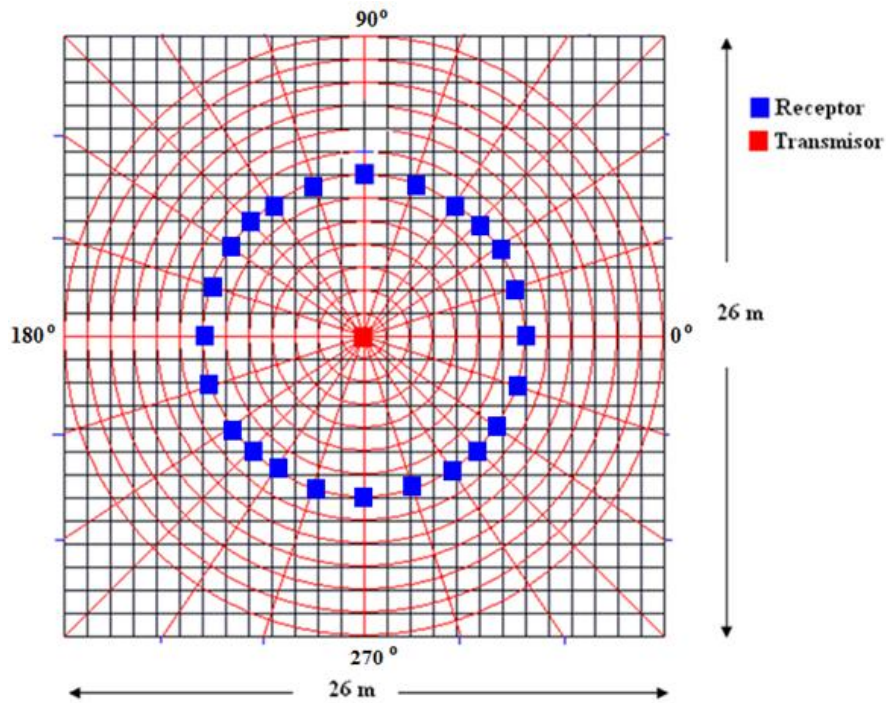


Figura 4.8. Acomodo de los dispositivos en la explanada de la facultad de ingeniería campus Mexicali, experimento de patrón de radiación con LOS

Finalmente, dentro de estos mismos experimentos los cuales se realizan para poder determinar el patrón de radiación, se expande más la distancia máxima entre transmisor y receptor, por lo cual se realizó otro experimento colocando el dispositivo transmisor al centro de una de las orillas de la explanada y se trazaron líneas alrededor del transmisor con una distancia entre líneas de 15 grados y sobre cada línea se colocó el receptor, con una distancia de 1 metro sobre la misma línea. En este experimento se cubrió un área de 26 metros de largo por 26 metros de ancho. Donde se puede ver de forma grafica en la figura 4.9.

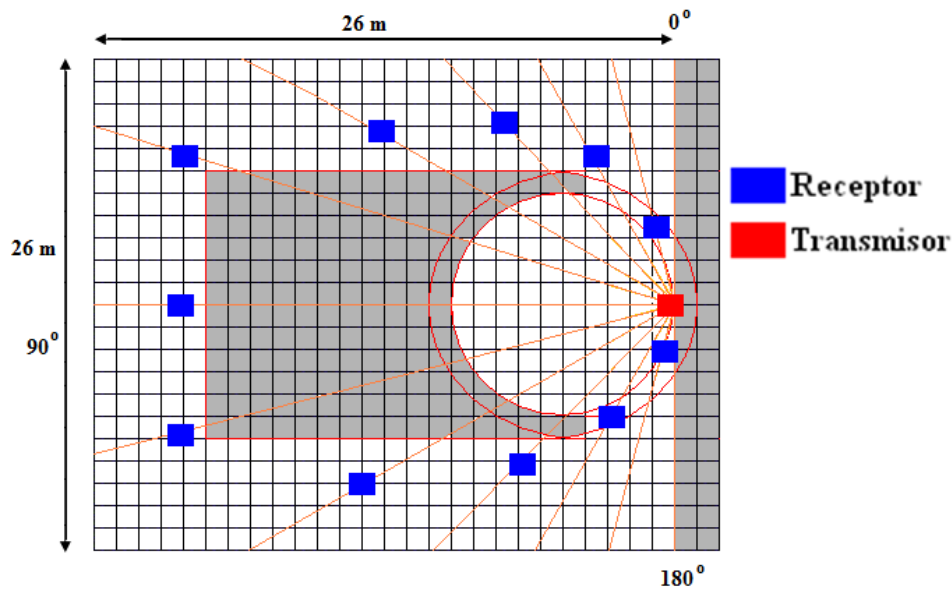


Figura 4.9 Acomodo de los dispositivos en la explanada de la facultad de ingeniería campus Mexicali, experimento de patrón de radiación extendido con LOS

Como segunda parte del experimento se realizó el mismo experimento anteriormente descrito pero esta vez con NLOS entre los dispositivos, cubriendo un área de 32 metros de largo por 26 metros de ancho, donde podemos verlo de forma ilustrada en la grafica 4.10.

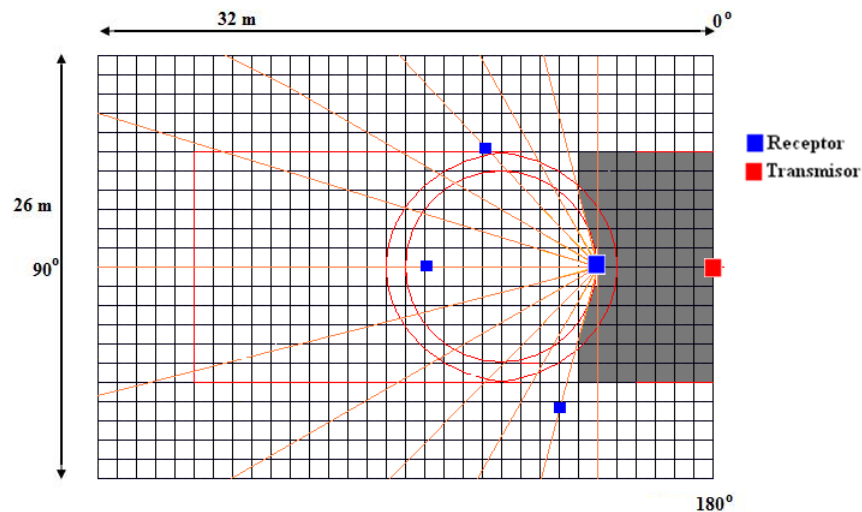


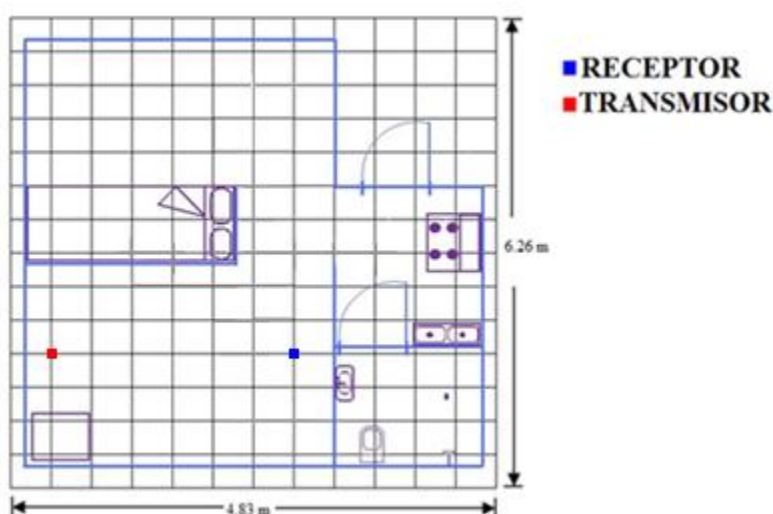
Figura 4.10. Acomodo de los dispositivos en la explanada de la facultad de ingeniería campus Mexicali, experimento de patrón de radiación extendido con NLOS

Con esto, finalizamos la parte de caracterización espacial, pasando a la descripción de experimentos realizados la caracterización temporal.

Tabla. 4.1 Frecuencias de los canales de operación de ZigBee

Canal	Frecuencia Central	Ancho de Banda
1	2.405	2.4025 – 2.4075
2	2.410	2.4075 – 2.4125
3	2.415	2.4125 – 2.4175
4	2.420	2.4175 – 2.4225
5	2.425	2.4225 – 2.4275
6	2.430	2.4275 – 2.4325
7	2.435	2.4325 – 2.4375
8	2.440	2.4375 – 2.4425
9	2.445	2.4425 – 2.4475
10	2.450	2.4475 – 2.4525
11	2.455	2.4525 – 2.4575
12	2.460	2.4575 – 2.4625
13	2.465	2.4625 – 2.4675
14	2.470	2.4675 – 2.4725
15	2.475	2.4725 – 2.4775
16	2.480	2.4775 – 2.4825

Con el fin de poder corroborar resultados se hizo una medición en otro de los cuartos, la ilustración gráfica del acomodo de los dispositivos en el cuarto contiguo al original se muestra en la figura 4.12, donde solamente se utilizó el canal 2 para hacer dicha medición.

**Figura 4.12.** Acomodo de los dispositivos en la caracterización temporal usando un entorno interior de casa-habitación con LOS

En este capítulo se hizo una explicación de los entornos de propagación en donde se realizaron mediciones, posteriormente en el capítulo 5, se mostrarán los resultados obtenidos en cada uno de los escenarios y entornos de propagación, donde se analizarán los resultados obtenidos, además de utilizar métodos estadísticos para poder tener un modelado de canal existente y ajustarlo a nuestros diferentes entornos de propagación.

Capítulo 5

Resultados

5.1 Características principales

En este capítulo, se analizarán los resultados obtenidos en las mediciones realizadas descritas en el capítulo anterior.

Primeramente, con el afán de analizar ordenadamente los resultados, se mostrarán los resultados obtenidos en la caracterización espacial, la cual se desarrollo en dos entornos de propagación diferentes. El primero, fue el entorno en interiores, en donde se consideraron dos lugares para el experimento, uno de ellos fue un ambiente ideal, donde estuviera libre de cualquier tipo de interferencia o dispersores, siendo este una jaula de Faraday, posteriormente se hicieron mediciones en una casa-habitación; el segundo entorno fue en exteriores, en donde, al igual que el entorno en interiores, se consideraron dos escenarios para los experimentos realizados, uno de estos fue el patio central de la Facultad de Ingeniería, campus Mexicali y el siguiente entorno, fue en la explanada principal de la Universidad Autónoma de Baja California campus Mexicali, plantel de ingenierías. Posteriormente, se mostrarán los resultados obtenidos en la caracterización temporal, la cual solo se realizó en un entorno de propagación, el cual fue en interiores y simplemente un escenario, el cual fue la casa-habitación.

Se utilizaron dos métricas en todos los experimentos, para poder determinar la calidad del enlace en la comunicación, una métrica es la potencia recibida (RSSI, por sus siglas en inglés Received Signal Strength Indicator) y la segunda métrica es la relación de paquetes erróneos (PER por sus siglas en ingles Packet Error Rate).

El protocolo de comunicación IEEE 802.15.4 nos indica, que cuando se tiene un valor de RSSI de -85 dBm, se debe tener en el peor de los casos un 1% de PER para determinar que se tiene un buen enlace en la comunicación [5].

Teniendo en cuenta estas consideraciones, se empezarán a mostrar los resultados obtenidos en cada uno de las pruebas realizadas.

5.2 Caracterización espacial

5.2.1 Entornos interiores

Como se mencionó anteriormente, el primer escenario en este entorno es el ideal, el cual se realizó en una jaula de Faraday, la jaula estaba libre de obstáculos y aislado completamente para evitar interferencias de otros dispositivos de comunicación inalámbrica; físicamente hablando, era un cuarto cuadrado de 4.5 metros cuadrados de área, por lo que los únicos desvanecimientos que afectaran a nuestra comunicación, serán las multitrayectorias. En la figura 5.1 se muestran los resultados de RSSI y PER en paquetes recibidos de cada uno de las mediciones.

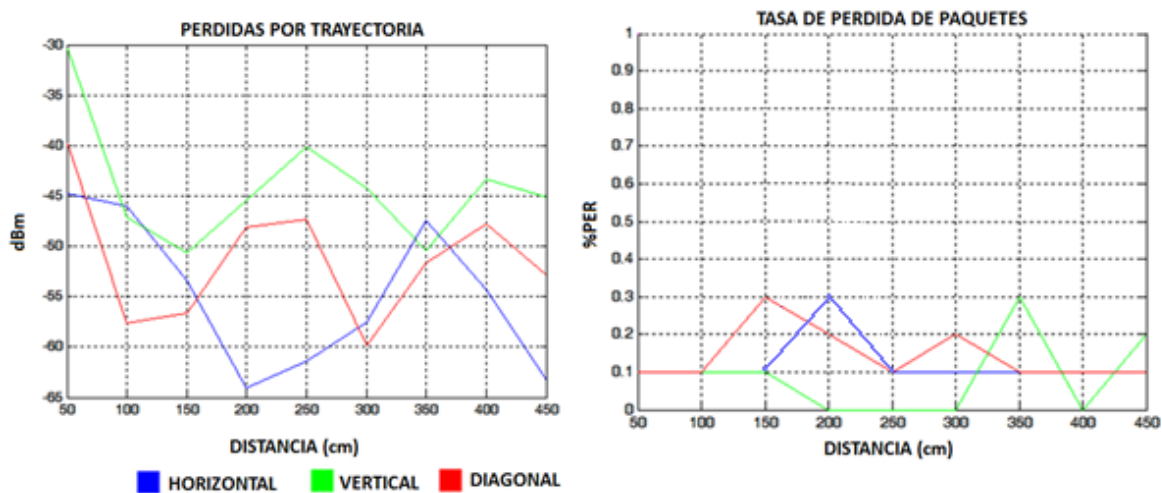


Figura 5.1. Valores de RSSI y PER en la Jaula de Faraday.

En la figura 5.1, se puede ver que el comportamiento de la señal en los tres canales, es prácticamente el mismo, de igual forma el porcentaje de PER, fue un rendimiento muy similar, a pesar de que se tuvo un comportamiento casi perfecto, se muestra como el desvanecimiento por multitrayectorias afecta a nuestra comunicación, teóricamente a mayor distancia entre los dispositivos a una misma potencia de transmisión, se debe tener un

menor valor de potencia recibida y como se puede apreciar en la figura 5.1, a una distancia de 250 cm se tiene una mejor potencia recibida a comparación de la muestra tomada a 150 cm. Pero, a pesar de ser un entorno ideal, el área de cobertura fue muy chica como para poder hacer un análisis más extenso sobre estos resultados. Posteriormente, se sacó un promedio de las mediciones realizadas, tanto de las gráficas de RSSI como de PER.

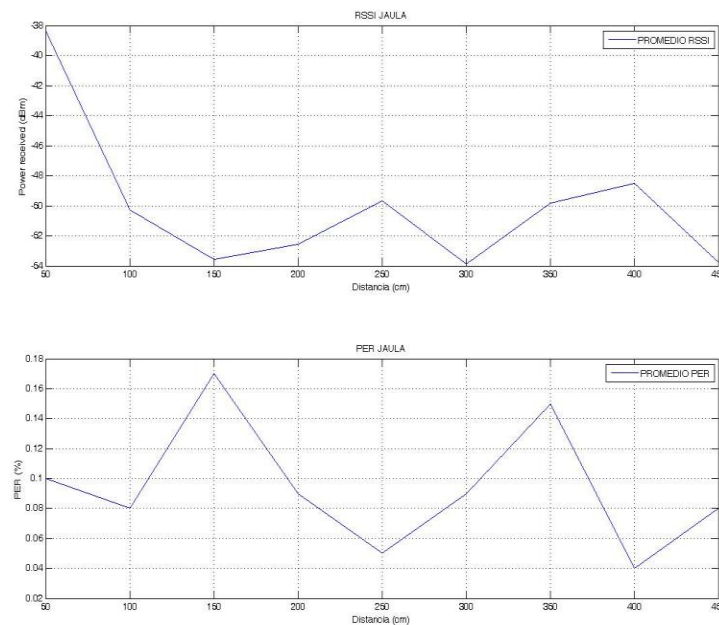


Figura 5.2. Promedio de valores de RSSI y PER en la Jaula de Faraday.

En donde se puede ver la tendencia decreciente de la forma de onda, lo que nos indica que a mayor distancia entre dispositivos, menor la potencia de recepción, cuando se tiene una misma potencia de transmisión, sin embargo, debido a las multitrayectorias se puede ver que algunas mediciones, dichas multitrayectorias mejoraron nuestra comunicación, dándonos una mejor potencia de recepción.

También se puede ver este fenómeno en el porcentaje de PER obtenido, debido a que a pesar de que, en todo momento se tuvieron porcentajes de PER menores al 0.2%, esto quiere decir que se recibieron 2 paquetes mal de cada 1000, pero, hay distancias que se tuvo un mejor porcentaje de PER a distancias más lejanas entre transmisor y receptor, tomando

en consideración que según el estándar de ZigBee, todos los puntos cumplen con la norma y se puede garantizar que se tiene un buen enlace en la comunicación.

Dentro de estos mismos entornos, se realizaron mediciones en una casa-habitación, el cual, era una superficie rectangular, con dimensiones de 4.83 metros por 6.26 metros, en el cual transmisor se puso al centro de la casa-habitación, en este entorno, se tenían muebles comunes de cualquier casa (cama, refrigerador, estufa, televisión, etc.), además de interferentes existentes en el ambiente, como lo son otras tecnologías de comunicación o dispositivos inalámbricos. El resultado de las mediciones realizadas se muestra en la figura 5.3.

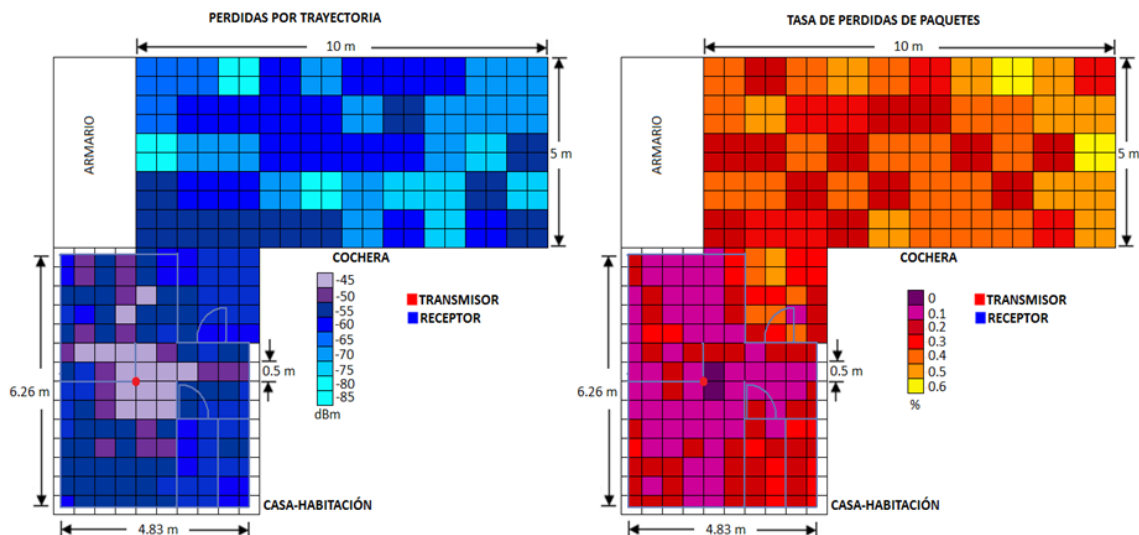


Figura 5.3. Valores de RSSI y PER en la casa-habitación.

En estas figuras se puede apreciar primeramente que todas las mediciones cumplen con la norma, teniendo un valor mínimo de PER de 0.6%, esto es 6 paquetes que no se recibieron de forma correcta de cada 1000, además de que el valor mínimo de RSSI, fue de -85 dBm, con lo que se garantiza un buen enlace en la comunicación, sin embargo, algo que se puede determinar es que el tener un buen valor de RSSI no conlleva a tener un buen valor de PER, esto se puede demostrar en los cuadros circundantes al dispositivo transmisor, donde se tiene un valor de -45 dBm y solo en dos de las mediciones se tuvo un PER del 0% y en el resto se tuvo valores de PER de 0.1%, además que los valores más bajos de RSSI y PER se encuentran cuando el dispositivo receptor y transmisor tuvieron

una pared que obstaculizara la línea de vista directa entre ellos, por lo cual se puede determinar que el desvanecimiento por sombreado afecta mucho a los dispositivos ZigBee. A pesar de esto, se puede ver concluir que los dispositivos ZigBee pueden cubrir distancias aun mayores que las utilizadas en este entorno. Finalmente se muestra en la tabla 5.1, la correlación encontrada en este entorno entre RSSI y PER.

Tabla 5.1. Correlación entre RSSI y PER en la casa-habitación.

RSSI (dBm)	PER (%)	Porcentaje Total (%)
-55	0.1	11.33
-65	0.2	9.26
-55	0.2	9.21
-65	0.4	5.53
-60	0.2	5.47
-70	0.4	5.44
-50	0.1	5.08
-65	0.3	4.52
-45	0.1	4.30
-65	0.5	4.04
-55	0.5	3.26
-70	0.2	3.26
-75	0.2	3.26
-75	0.4	3.26
-60	0.1	2.74
-55	0.3	2.57
-55	0.4	2.57
-70	0.5	2.16
-80	0.2	2.16
-50	0.2	1.56
-60	0.2	1.56
-45	0.2	1.17
-55	0.6	1.08
-65	0.6	1.08
-75	0.5	1.08
-80	0.4	1.08
-45	0	0.78
-60	0.4	0.78
-50	0.3	0.39

El mayor porcentaje de mediciones tuvieron un 11.33% del total de las mediciones con valores de RSSI de -55 dBm y 0.1% de PER, teniendo como valor mínimo con 0.39% de las mediciones totales -50 dBm y 0.3% de PER, donde el valor más alto de PER

obtenido fue de 0.6% de PER en valores de RSSI de -55 dBm y -60 dBm, cuando el valor mínimo obtenido de RSSI fue de -80 dBm con un valor de 0.2% de PER, con lo que se demuestra una conclusión antes determinada, la cual es, que el tener un buen valor de RSSI no significa que se tendrá un buen valor de PER.

Con esto terminamos los resultados obtenidos en entornos interiores y se pasa a mostrar los resultados obtenidos en entornos exteriores.

5.2.2 Entornos exteriores

En esta parte, se analizarán los resultados que se obtuvieron de los entornos exteriores, primeramente, se determinó la cobertura máxima que alcanzan los dispositivos de comunicación, se localizó un entorno exterior lo más ideal posible, esto es, que existiera la menor cantidad de interferentes o dispersores en los alrededores, por lo cual se utilizó la explanada principal de la Universidad Autónoma de Baja California sección ingenierías, en donde el transmisor se acomodó en uno de los extremos de la explanada y el receptor fue moviéndose en línea recta cada metro para hacer una medición, hasta llegar a una distancia máxima de 68 metros. Los resultados obtenidos en este experimento se muestran en la figura 5.4.

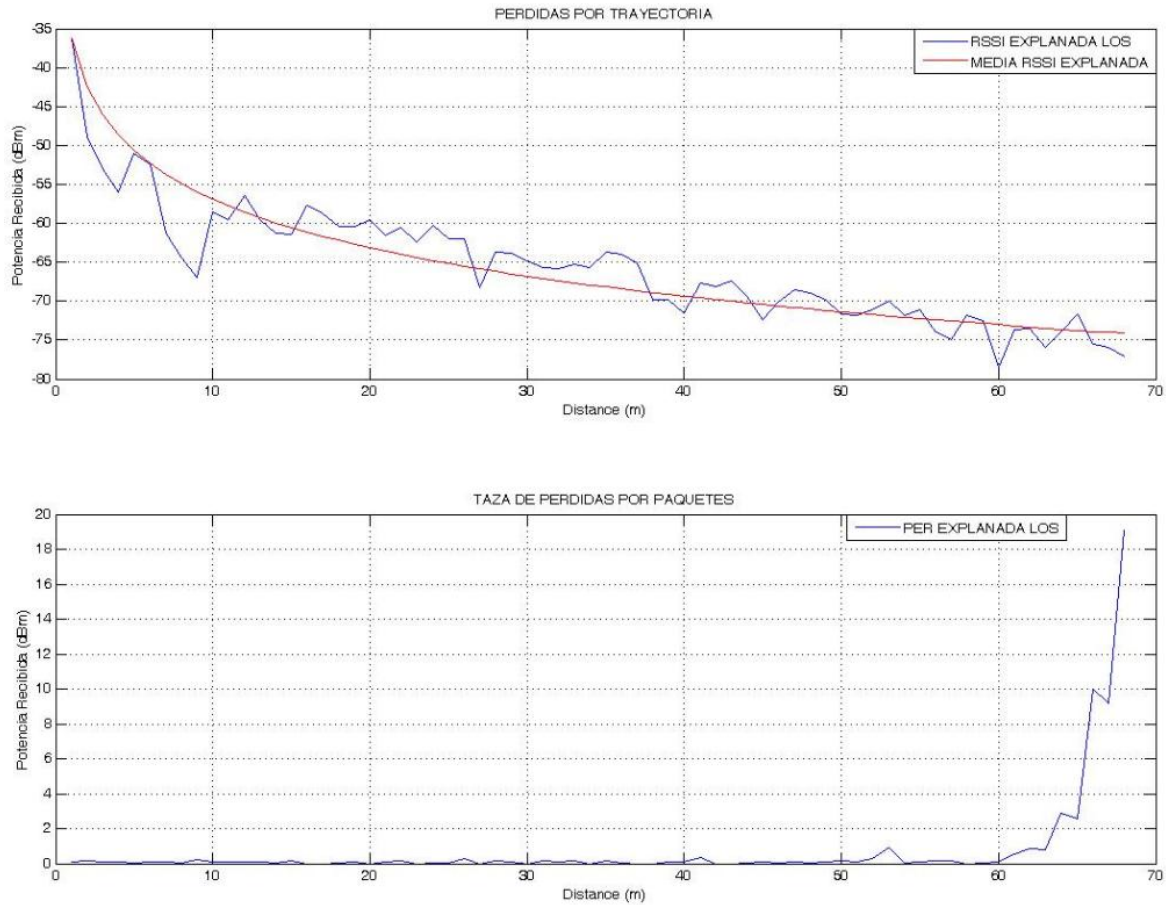


Figura 5.4. Valores de RSSI y PER explanada UABC campus Mexicali.

Como se puede apreciar en la gráfica de RSSI, existen algunos picos en la señal tanto positivos como negativos, sin embargo, se puede apreciar que aproximadamente la máxima cobertura en entornos exteriores con poca interferencia para estos dispositivos es de 63 metros, debido a que a los 64 metros se puede ver como se tiene un porcentaje de PER mayor al 1%, con lo cual la calidad del enlace ya no es satisfactorio. Se sacó un valor de media para poderlo comparar nuestra medición con un modelo ideal de propagación, el cual nos indica que a mayor distancia menor la potencia de recepción y se comprueba con las mediciones que se sigue este patrón. Para poder determinar la media se utilizó la expresión mostrada en la ecuación 5.1.

$$MediaRSSI = 10\log_{10}\left(\frac{1}{d^\alpha}\right) \quad (5.1)$$

En donde d es la distancia que existe entre el transmisor y el receptor y α es el valor de ajuste dependiendo el terreno, en nuestro caso para entornos exteriores se utiliza un valor de -4.

Debido a que se hicieron otras dos mediciones de este tipo en otro escenario, se consideraron los primeros 50 metros de cobertura en este entorno con el fin de poderlas comparar con las otras mediciones y debido a que las mediciones obtenidas tienen una gran similitud con la media se determinó utilizar este resultado como una medición ideal al compararla con las otras mediciones.

Posteriormente, se utilizó la explanada de la Facultad de Ingeniería campus Mexicali para realizar los demás experimentos de la caracterización espacial, en general, tendremos un entorno característico de una escuela con alumnos, estructuras de ladrillo y vigas de acero, plantas, interferentes (como Wi-Fi y tecnologías celulares), etc.

La primera prueba realizada fue determinar la máxima área de cobertura en este entorno, tanto con línea de vista directa (LOS por sus siglas en inglés Line-of-Sight) como cuando no se tiene línea de vista directa (NLOS por sus siglas en inglés No-Line-of-Sight). Como se mencionó anteriormente, se hará una comparación con nuestra medición ideal, el resultado se muestra en la figura 5.5.

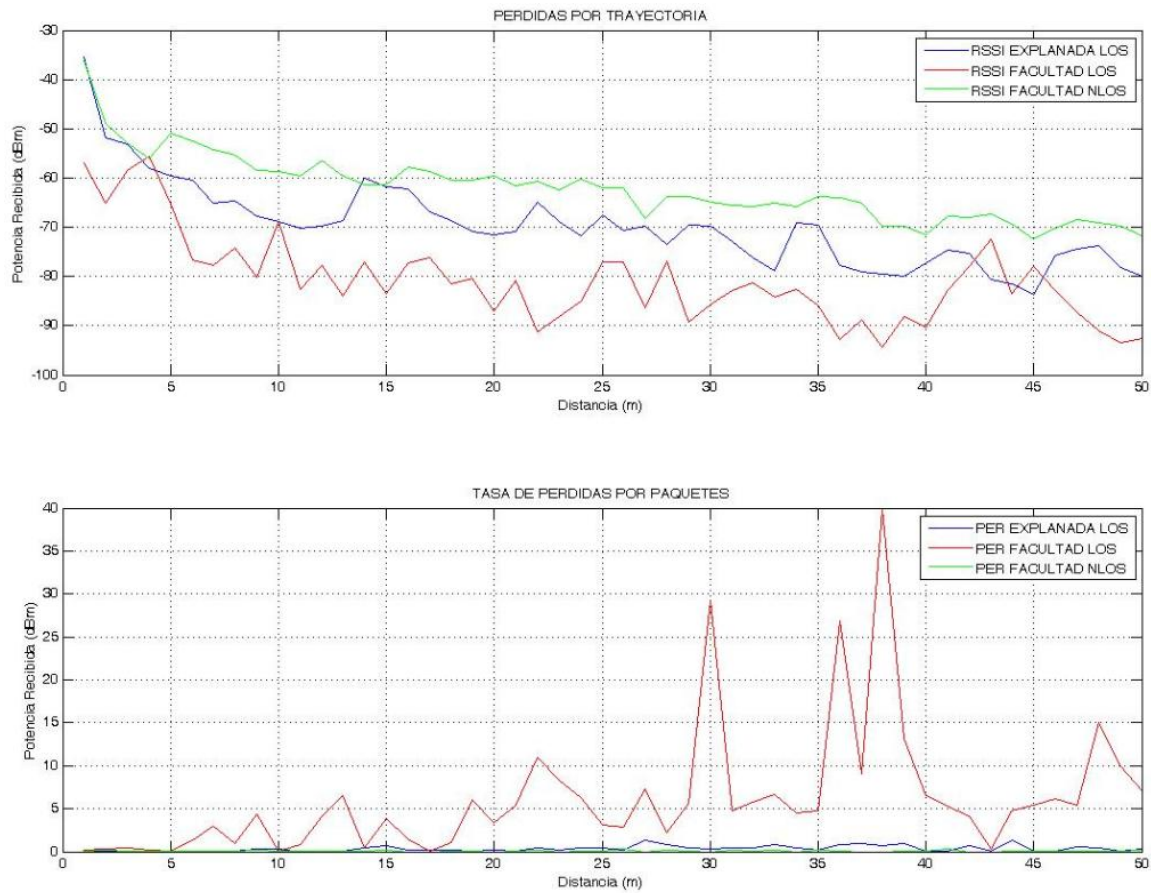


Figura 5.5. Comparación de RSSI y PER explanada UABC y Facultad de Ingeniería campus Mexicali.

Con la figura 5.5 se demuestra que los diferentes interferentes y desvanecimientos, afectan nuestro enlace de comunicación, debido a que en comparación con las dos mediciones donde se tenía LOS, al tener más dispersores e interferencia de otras tecnologías, obtenemos a una misma distancia un valor más bajo de RSSI, por su parte los valores de PER se aprecia cómo es que en las pruebas realizadas en la Facultad de Ingeniería se tienen porcentajes más altos de PER, sin embargo, todas las mediciones están dentro de la norma establecida por ZigBee, teniendo el valor más bajo de aproximadamente -82 dBm en el caso de la Facultad de Ingeniería y de -71 dBm en el caso de la explanada principal del campus; esto nos indica que cuando se tiene LOS estos dispositivos pueden cubrir distancias mayores.

Sin embargo, podemos encontrar dos mediciones, la primera de ellas a los 22 metros y la segunda a los 44 metros, del experimento realizado con LOS en la Facultad de

Ingeniería, en la cual encontramos zonas grises, debido a que se tienen porcentajes de PER mayores al 1%, con lo que no se puede garantizar un buen enlace en la comunicación, sin embargo en las mediciones subsecuentes los porcentajes de PER bajan del 1% de PER.

Por otra parte, se puede ver que desde el inicio de las mediciones, el valor obtenido de RSSI en el caso del experimento con NLOS se tiene valores mucho más bajos, inclusive a una distancia de 6 metros entre los dispositivos, ya se tenían pérdidas por encima del 1%, esto nos indica que debido a los dispersores existentes en el entorno, se generan más puntos de reflexión y por consiguiente una mayor cantidad de multitrayectorias, las cuales afectan a nuestra comunicación y como conclusión, se determina que los dispositivos ZigBee trabajan mejor cuando tienen LOS que cuando se tiene NLOS. Sin embargo, podemos ver efectos positivos debido a las multitrayectoria, en la medición realizada a los 43 metros con NLOS, donde se puede apreciar, que se tienen un valor de -72 dBm, la cual es inclusive mayor a la medición realizada a esa misma distancia con LOS en la explanada de la Facultad de Ingeniería y el porcentaje de PER está por debajo del 1%, por lo cual en este punto podemos encontrar una buena calidad en el enlace. Y por lo tanto determinamos que cuando se tiene una comunicación NLOS, los dispositivos no cubren el área total, abarcando valores de PER menores al 1% aproximadamente 5 metros entre los dispositivos, teniendo algunos puntos que gracias a las multitrayectorias podemos tener buen enlace en la comunicación.

Posteriormente, como ya se mencionó, por motivos de practicidad, todos los modelos de propagación teóricos, determinan que los patrones de radiación en cualquier entorno de propagación son simétricos, sin embargo, en la vida real estos patrones de radiación son asimétricos y se realizó un experimento para demostrar este hecho.

En el cual, en el mismo entorno de la Facultad de Ingeniería, se acomodó el transmisor al centro de la explanada y se marcaron círculos alrededor del transmisor, de 1 metro de separación entre anillos hasta cubrir un área total de 26 metros de diámetro, en donde el receptor fue acomodado en cada uno de los círculos cada 15 grados de separación, considerando que en todo momento se tenía LOS. El resultado de las mediciones se muestra en la figura 5.6.

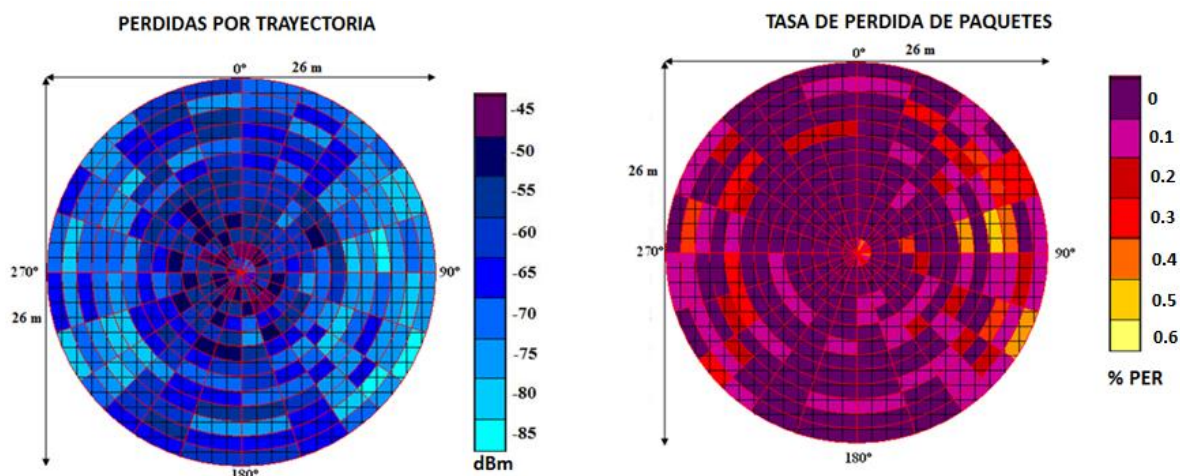


Figura 5.6. Valor de RSSI y PER patrón de radiación.

En este ambiente, se puede ver en la figura 5.6, que en las partes laterales de la medición (90° y 270°) se obtuvieron los valores más bajos de las mediciones con resultados de hasta -85 dBm, a comparación de las partes superior e inferior (0° y 180°), en la cual se tuvieron valores más altos de RSSI al igual que los valores de PER, donde a pesar de que todas las mediciones se encontraron por debajo del 1% de PER y se puede garantizar un buen enlace en la comunicación, se tuvieron tres puntos grises, que nos dieron valores de 0.5 y 0.6% de PER a los 90° , esto debido a que en las zonas laterales se tenían jardineras, de concreto y estructuras metálicas, además de plantas y tierra, las cuales actuaron como dispersores y se generaron multitrayectorias las cuales afectaron en nuestra comunicación. Para poder apreciar mejor los resultados obtenidos, se muestra en la tabla 5.2 la correlación entre el RSSI y el PER para estas mediciones. Aunque se puede determinar que las áreas de coberturas que puede alcanzar estos dispositivos, pueden ser aun mayores.

Tabla. 5.2 Correlación entre RSSI y PER en la Facultad de Ingeniería experimento de patrón de radiación.

RSSI (dBm)	PER (%)	Porcentaje Total (%)
-55	0	17
-60	0	16
-50	0	12
-65	0	12
-45	0	7.33
-75	0.1	6.68
-70	0.1	4.33
-75	0	4
-70	0	3.67
-65	0.1	3.33
-80	0.1	3
-75	0.3	2
-80	0.3	1.67
-75	0.2	1.33
-80	0.2	1.33
-60	0.1	0.67
-65	0.3	0.67
-70	0.3	0.67
-85	0.5	0.67
-70	0.2	0.33
-75	0.4	0.33
-80	0	0.33
-85	0.2	0.33
-85	0.6	0.33

Donde podemos ver que el mayor porcentaje de mediciones obtenidas fue el valor del RSSI de -55 dBm y un PER de 0% con el 17 % de todas las mediciones. El menor porcentaje de las mediciones fue el valor de -85 dBm con un PER de 0.6% repitiéndose 0.33% de las veces en las mediciones, siendo de igual forma el peor valor obtenido en la medición. A su vez que el mejor valor obtenido fue -45 dBm de potencia recibida y un porcentaje de PER de 0% con un total del 7.33% de las mediciones realizadas.

Si consideramos un límite de -85 dBm, se traza el patrón de radiación el cual se muestra en la figura 5.7, en donde podemos comprobar que el patrón de radiación es asimétrico. En donde, se puede ver que el transmisor se acomoda al centro del escenario y

se dibujo con una línea roja, el patrón de radiación teórico del entorno y con una línea negra se dibujo el patrón de radiación real obtenido a base de las mediciones realizadas.

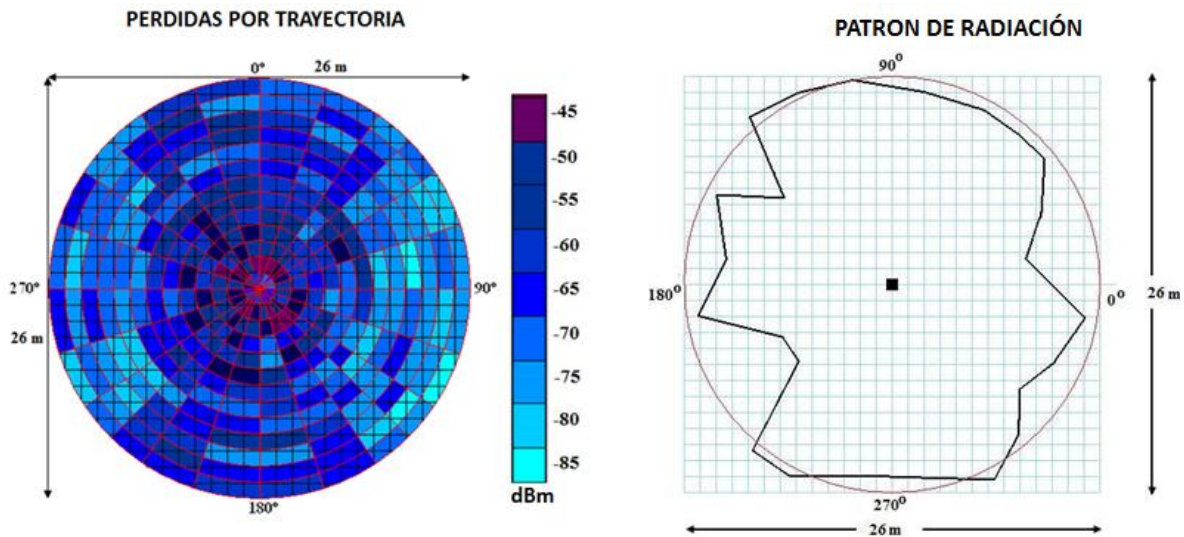


Figura 5.7. Patrón de radiación de la Facultad de Ingeniería.

Finalmente, en las pruebas realizadas en la caracterización espacial y en los entornos de propagación interiores, se realizó un experimento con el fin de poder determinar un área de cobertura tanto con LOS como con NLOS. En este ultimo escenario, se colocó el transmisor en el centro de la explanada de la Facultad de Ingeniería y se trazaron líneas con una separación de 15° una de la otra, el receptor se acomodó recorrió por cada línea 1 metro de distancia a la vez. Los resultados obtenidos de estas mediciones se mostrarán en la figura 5.8.

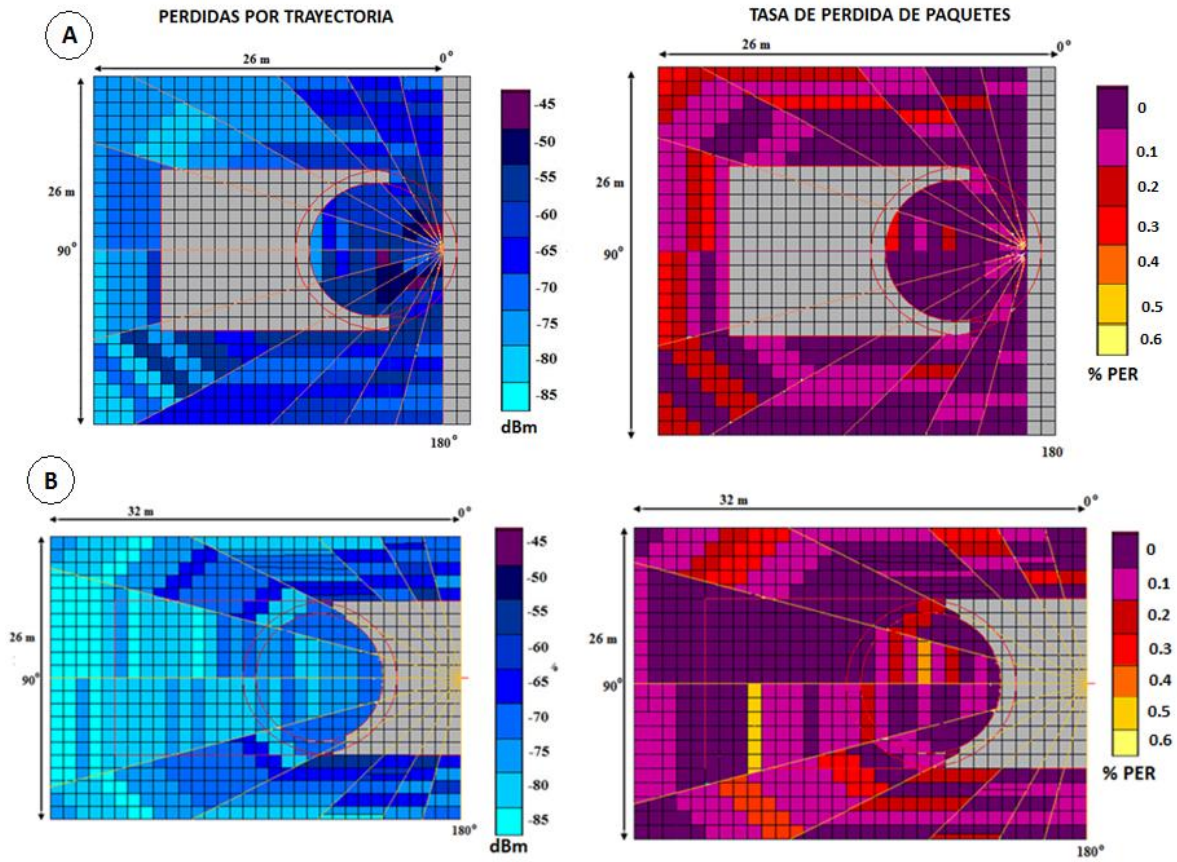


Figura 5.8. A. Valores de RSSI y PER área de cobertura con LOS **B.** Valores de RSSI y PER área de cobertura NLOS.

En donde se puede observar en la figura 5.8 en el escenario A, que entre más cerca estén los dispositivos se tiene un mejor valor de RSSI, sin embargo, en cuanto al valor de PER se refiere, se puede ver un buen rendimiento en general, debido a que con LOS se tuvo el menor porcentaje de 0.3% de PER, esto es 3 paquetes malos de cada 1000, con lo cual en toda el área de medición se garantiza un buen enlace en la comunicación. Por otra parte, se puede apreciar que en los valores obtenidos en el escenario B, que se obtuvieron valores de RSSI menores a comparación del escenario A. Lo cual nos indica que se obtuvo un mejor rendimiento cuando se tiene LOS que cuando no se tiene NLOS, sin embargo en ambos escenarios se puede garantizar tener un buen enlace en la comunicación, debido a que todas las mediciones se tuvieron valores por debajo del 1% de PER.

En el escenario B, se pueden apreciar dos zonas grises von valores de PER de 0.5 y 0.6%, esto es 5 y 6 paquetes malos de cada 1000. Estos resultados se pueden apreciar de manera más clara en la tabla de correlación 5.3.

Tabla. 5.3 Correlación entre RSSI y PER en la Facultad de Ingeniería área de cobertura.

CORRELACIÓN LOS			CORRELACION NLOS		
RSSI (dBm)	PER (%)	Porcentaje Total (%)	RSSI (dBm)	PER (%)	Porcentaje Total (%)
-75	0.1	17.30	-70	0	16.17
-65	0	15.71	-80	0	11.82
-55	0	11.92	-85	0	9.64
-60	0	10.74	-70	0.1	7.93
-75	0	6.56	-75	0.1	7.15
-65	0.1	4.17	-80	0.1	6.69
-70	0.1	4.17	-65	0	6.22
-85	0.2	4.17	-75	0	6.22
-55	0.1	3.78	-85	0.1	5.29
-75	0.3	3.78	-70	0.3	4.82
-70	0	3.38	-65	0.1	3.89
-75	0.2	3.18	-70	0.2	1.71
-80	0	2.39	-60	0.1	1.56
-50	0	1.79	-65	0.3	1.56
-70	0.2	1.39	-85	0.2	1.56
-70	0.3	1.39	-60	0	1.40
-80	0.3	1.39	-75	0.2	1.40
-45	0	0.80	-80	0.3	1.24
-60	0.3	0.8	-55	0.2	0.93
-65	0.2	0.8	-80	0.6	0.93
-60	0.2	0.39	-85	0.3	0.78
			-55	0	0.62
			-80	0.5	0.47

En la tabla 5.3, se muestran los valores de correlación del área de cobertura de la Facultad de Ingeniería, donde cuando tenemos un entorno LOS que el máximo porcentaje de valores es de -75 dBm con un PER de 0.1% obteniendo el 17.30% del total de las mediciones realizadas, por su parte el entorno NLOS obtuvo como máximo valor de -70 dBm con un per de 0% con un 16.17%. Lo que podemos apreciar en esta correlación es que se tiene la mejor correlación con el entorno NLOS debido a que la mayoría de las mediciones se obtuvo el valor de -70 dBm y 0%, sin embargo, como se ve en la figura 5.8, se obtuvo en toda el área de cobertura un mejor rendimiento con el escenario LOS.

Si analizamos, por otra parte, los mejores valores y los peores valores obtenidos, vemos que en el entorno LOS se obtuvo como mejor valor una potencia de -45 dBm con un PER de 0% mientras que en el caso de NLOS se obtuvo como mejor valor una potencia de -55 dBm con un PER de 0%, lo que nos da una diferencia de -10 dBm con un mismo valor

de PER, mientras que el peor valor de LOS fue de una potencia de -85 dBm con un PER de 0.2%, mientras que en el entorno NLOS se obtuvo una potencia de -85 dBm y un PER de 0.3%, esto quiere decir que el peor valor en ambos escenarios fue el NLOS debido a que se obtuvo una misma potencia de transmisión, sin embargo se tuvo un valor de 0.1% de PER, lo que es 1 paquete mal de cada 1000.

Con esto termina la caracterización espacial y se abre paso a la caracterización temporal, donde en conclusión vemos que objetos que se encuentran cerca de los dispositivos, que funcionan como dispersores, afectan a nuestra comunicación, debido a que se generan multitrayectorias, las cuales hacen que se tengan desvanecimientos en la señal, haciendo de ZigBee muy susceptible a este fenómeno y como se apreció en uno de los experimentos el desvanecimiento por sombreado (al atravesar paredes) hace que se tengan valores de RSSI menores que cuando no existen interferentes de este tipo, haciendo que el RSSI dependa de las características físicas del entorno de propagación, por otra parte, se puede determinar que se tiene un mejor enlace en la comunicación cuando se tienen un entorno LOS que cuando se tiene un entorno NLOS, finalmente, se puede decir que el tener un buen valor de RSSI no significa que se tendrá un buen valor de PER.

5.3 Caracterización temporal

Después de realizar la caracterización espacial, se hizo una caracterización temporal, este tipo de caracterización se realiza para analizar y razonar la variabilidad de los componentes en un entorno considerando las secuencias de tiempo en general. El entorno utilizado para esta caracterización fue el entorno de la casa-habitación, descrito anteriormente, en donde se utilizó uno de los cuartos, con características típicas de una habitación (cama, televisión, aire acondicionado, ventanas, ropa, muebles de cuarto, etc.), se colocaron los dispositivos de comunicación a una distancia de tres metros uno del otro, enviando una ráfaga de 3000 paquetes, con una longitud de 18 bytes cada paquete, los dispositivos fueron programados para trabajar las 24 horas del día en los 16 canales (1 canal por día), se transmitía una ráfaga de paquetes cada 5 minutos, tardando 2 minutos en enviar la ráfaga, por lo que cada 7 minutos se realizaba una medición. En la tabla 5.4 se

muestran los canales utilizados, sus frecuencias centrales y sus anchos de banda correspondientes.

Tabla 5.4. Frecuencias de los canales de operación de ZigBee

Canal	Frecuencia Central	Ancho de Banda
1	2.405	2.4025 – 2.4075
2	2.410	2.4075 – 2.4125
3	2.415	2.4125 – 2.4175
4	2.420	2.4175 – 2.4225
5	2.425	2.4225 – 2.4275
6	2.430	2.4275 – 2.4325
7	2.435	2.4325 – 2.4375
8	2.440	2.4375 – 2.4425
9	2.445	2.4425 – 2.4475
10	2.450	2.4475 – 2.4525
11	2.455	2.4525 – 2.4575
12	2.460	2.4575 – 2.4625
13	2.465	2.4625 – 2.4675
14	2.470	2.4675 – 2.4725
15	2.475	2.4725 – 2.4775
16	2.480	2.4775 – 2.4825

Con esto, empezaremos a mostrar los resultados de cada uno de los canales, mostrando en la figura 5.9 los resultados obtenidos.

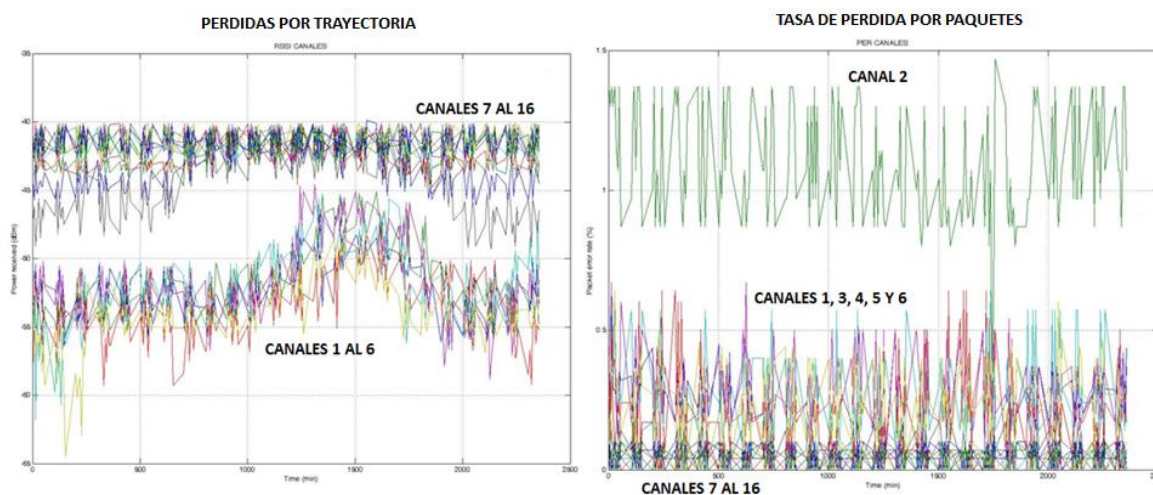


Figura 5.9. Valores de RSSI y PER caracterización temporal

Como se puede observar en la figura 5.9, los canales más bajos (1 al 6), muestran una potencia más baja que los demás canales, también existe una interferencia la cual hace que la mayor parte del día se tenga una potencia de recepción aproximadamente de -55 dBm, teniendo un pico de aproximadamente -50 dBm acentuándose a las 15:00 hrs (3:00 pm), mientras que los canales intermedios (7 al 10), empiezan a mejorar su rendimiento hasta que en los canales superiores (11 al 16) se tiene un comportamiento prácticamente igual en sus canales con una potencia de recepción de aproximadamente -40 dBm, lo que hace una diferencia de -15 dBm, entre los canales inferiores y los canales superiores, esto es debido a que la mayoría de los aparatos inalámbricos que se tienen en una casa (Control remoto, internet vía Wi-Fi, horno de microondas, etc.), trabajan en la frecuencia libre de 2.4 Ghz, por lo que sus frecuencias de operación se encuentran en las mismas frecuencias de operación de ZigBee y estos dispositivos inalámbricos en particular, están operando en las frecuencias cercanas a las frecuencias bajas de ZigBee, causando mayor interferencia.

Por otra parte, los valores obtenidos de PER, se muestra como todos los canales, excepto el canal 2, están por debajo del 1% de PER, sin embargo, en los canales bajos del 1 al 6 se tiene un promedio de 0.2% en PER, esto es 2 paquetes mal de cada 1000, pero, se puede apreciar como el canal 2 está por encima del 1% de PER, lo cual nos indica que existe algún interferente el cual está ocasionando que este canal tenga muchas pérdidas en la tasa de paquetes enviados, mientras que en los canales del 7 al 9 se tienen promedios de 0.06% de PER, esto es 6 paquetes mal de cada 10000 y finalmente en los canales superiores se tienen resultados de 0.03% de PER esto es 3 paquetes mal de cada 10000. En la tabla 5.5 se muestra la correlación existente entre los valores de RSSI y PER.

Tabla. 5.5 Correlación entre RSSI y PER caracterización Temporal

CANAL	PROMEDIO RSSI	PROMEDIO PER
1	-52.2988	0.2885
2	-51.5379	1.0964
3	-53.2612	0.2122
4	-51.8641	0.2747
5	-51.7083	0.2907
6	-53.8840	0.2599
7	-44.4485	0.0840
8	-43.3913	0.0646
9	-42.6820	0.0464
10	-42.5786	0.0356
11	-41.7534	0.0378
12	-41.4039	0.0384
13	-41.4432	0.0388
14	-41.4481	0.0394
15	-41.4738	0.0389
16	-41.4350	0.0422

En la tabla 5.5 podemos ver como del canal 1 al 6 se tienen medias de aproximadamente -52 dBm, mientras que en los canales intermedios del 7 al 10, esta media sube hasta -43 dBm y finalmente se obtiene el mejor rendimiento en los canales superiores con -41 dBm. Como se describió anteriormente, se tienen mejores valores de PER y de RSSI en los canales más altos que maneja ZigBee, esto debido a las interferencias existentes en el ambiente.

Siendo así, se procedió a tomar el canal con el valor más bajo de RSSI (en este caso el canal 6), el canal con el valor más alto de PER (en este caso el canal 2), en otras palabras, los canales con el peor rendimiento en la comunicación y de igual forma el canal con el mejor rendimiento de RSSI (en este caso el canal 12). Y se volvieron a realizar los experimentos, con la diferencia de que se apagaron todos los dispositivos de comunicación inalámbrica (Wi-Fi, control remoto, etc.), dichos resultados se pueden observar en la figura 5.10 se muestran los valores de RSSI y en la figura 5.11 se muestran los resultado de PER.

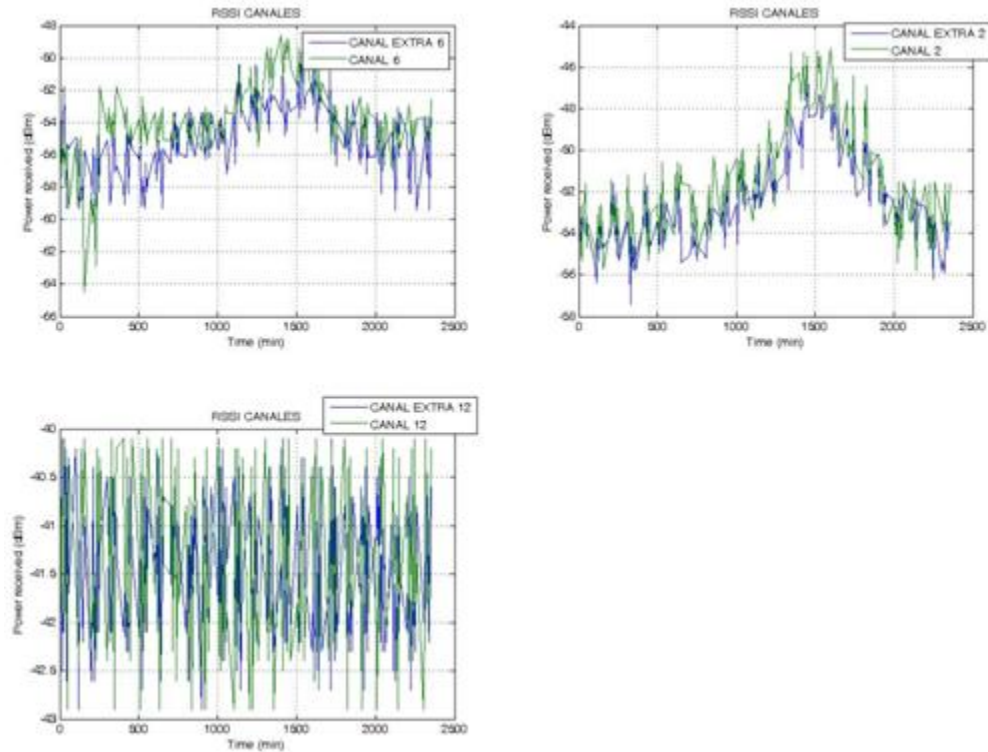


Figura 5.10. Comparación de valores de RSSI de los canales 2,6 y 12

Lo que se puede apreciar en los tres canales es que la señal tiene un mismo comportamiento, inclusive, se puede observar que los canales realizados sin interferentes en la casa-habitación, tienen un rendimiento más bajo que los obtenidos con la interferencia de otras tecnología de comunicación, lo que nos indica que con los otros interferentes se generaban multitrayectorias las cuales ayudaban a la comunicación con los dispositivos ZigBee. Sin embargo, existe todavía algún dispositivo de comunicación externo a la casa, el cual interfiere a nuestra comunicación, ocasionando que se tenga un rendimiento más bajo en la comunicación.

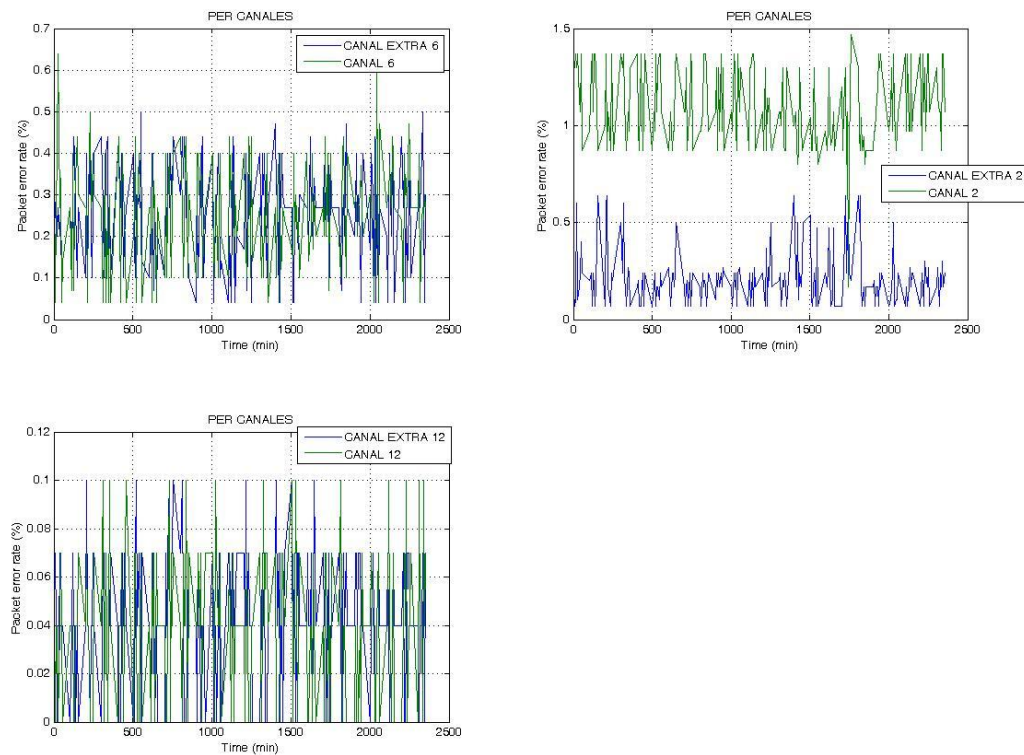


Figura 5.11. Comparación de valores de PER de los canales 2,6 y 12

Por otra parte, al hacer de nueva cuenta las mediciones se puede ver que en los canales 6 y 12 que se tiene un comportamiento muy similar al anterior, por lo que la interferencia de otros dispositivos de comunicación inalámbrica no afectaron en este canal, sin embargo, el canal 2 si tuvo una mejora considerable, haciendo que el porcentaje de PER baje del 1%. Para analizar esto de forma más explícita se presentan los resultados de RSSI y PER en la tabla 5.6.

Tabla. 5.6 Comparación de valores de RSSI y PER de los canales 2, 6 y 12

CANAL	RSSI	PER
ORIGINAL 2	-51.5379	1.0964
EXTRA 2	-52.4056	0.2122
ORIGINAL 6	-53.8840	0.2599
EXTRA 6	-55.0451	0.2551
ORIGINAL 12	-41.4039	0.0384
EXTRA 12	-41.4675	0.0415

Como se muestra en la tabla 5.6, los valores de RSSI de todos los canales obtuvieron un valor más bajos de RSSI, pero por otra parte, en los canales 2 y 6 se obtuvieron mejores porcentajes de PER. Con esto se determina que algunos de los dispositivos de comunicación en la casa y más específicamente los de servicios de Internet vía Wi-Fi, trabajan a la frecuencia del canal 2, con lo que ZigBee es muy vulnerable a la interferencia con otros dispositivos de comunicación en distancias cortas.

Finalmente, se tomó el canal 2 y se realizó otro experimento en otra de las habitaciones de la casa, considerando que todos los dispositivos de comunicación inalámbrica estuvieran apagados, esto para poder determinar que factor externo afecta a nuestra comunicación en los canales más bajos del ZigBee (canales del 1 al 6). Dichos resultados se pueden observar en la figura 5.12.

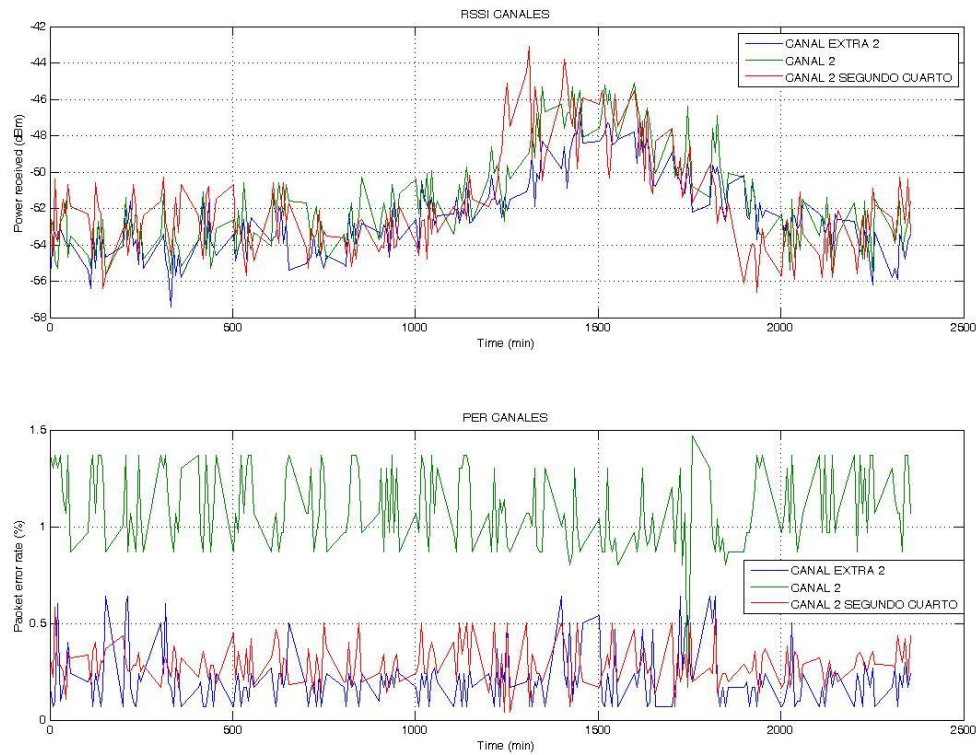


Figura 5.12. Comparación de valores de RSSI y PER en el canal 2

Como se puede ver en la figura 5.12, el rendimiento es el mismo, en ambos cuartos, con lo cual se determinó que existe alguna comunicación cercana a la casa-habitación, la cual interfiere con nuestra comunicación. Mostrando la correlación de estas mediciones en la tabla 5.7.

Tabla. 5.7 Comparación de valores de RSSI y PER del canal 2

Medición	RSSI (en dBm)	PER (en %)
Canal 2 original	-51.53	1.0964
Canal 2 segunda medición	-52.40	0.2122
Canal 2 segundo cuarto	-51.77	0.2885

En la tabla 5.7 se puede observar que el promedio de los valores de RSSI es muy similar en los tres cuartos, de igual forma el valor de PER cuando las interferencias de la casa-habitación están apagados es muy similar, sin embargo, se detecto que existe una

empresa la cual tiene comunicación vía radio frecuencia con varios de sus repartidores, la cual es la causa de la interferencia en nuestro sistema de comunicación.

Con esto, se termina la caracterización temporal, concluyendo que ZigBee es muy vulnerable a la interferencia de otras comunicaciones, sin embargo, se detecto que la interferencia hace que se tenga una mejor potencia de recepción de los paquetes, pero afecta a nuestros valores de PER. Por otra parte, se puede ver cómo es que la gran mayoría de los dispositivos de comunicación inalámbrica que existen en nuestras casas, trabajan cerca de los canales del 1 al 6 de ZigBee, por lo cual es recomendable utilizar los canales con más frecuencia de ZigBee (de los canales 10 al 16).

Finalmente, en este capítulo, se utilizó un modelado de canal existente (modelado de canal Ray Tracing), el cual se describirá a continuación.

5.3 Modelado de canal Ray-Tracing

Este es un modelado de canal, donde se asume una cantidad finita de trayectorias, sabiendo las características dieléctricas de los dispersores. Esta técnica hace una aproximación de la propagación de las ondas electromagnéticas para determinar las reflexiones y difracciones de las diversas trayectorias, debemos considerar que si se considera una mayor cantidad de rayos en este modelo, el modelado resultante será más similar al entorno de propagación real.

En este trabajo de investigación, se utilizó un modelo Ray Tracing de 10 rayos, en la figura 5.13 se muestra más claramente el recorrido de las trayectorias desde que sale del dispositivo transmisor hasta arribar al dispositivo receptor.

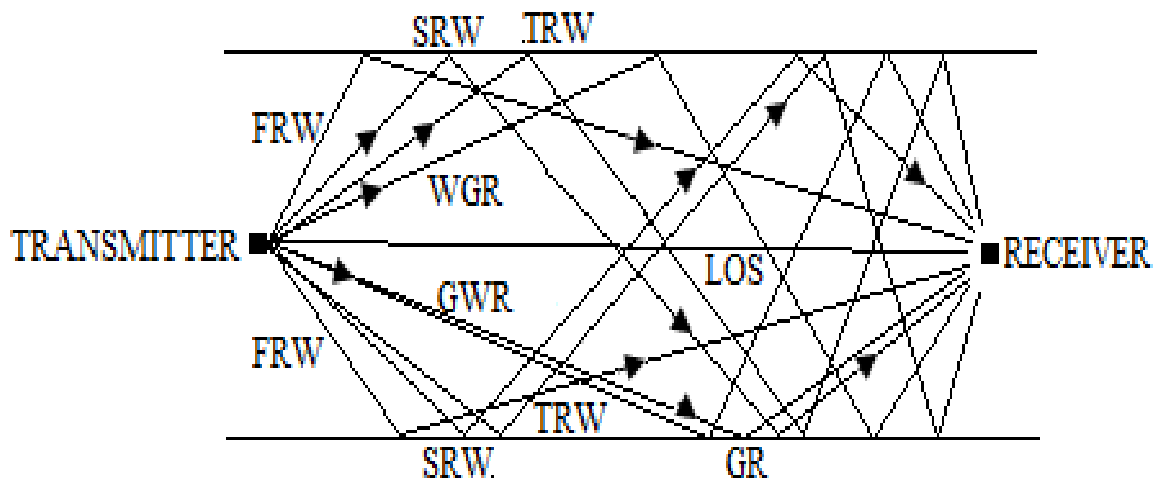


Figura 5.13. Ejemplo modelo Ray Tracing de 10 rayos

En la figura 5.13, se pueden observar los diez rayos que se simula, en nuestro caso el transmisor y el receptor se encuentran a la misma altura y a la misma distancia y se tienen dos paredes a los lados, los cuales fungen como dispersores en donde el rayo tendrá reflexiones, los diez rayos de este modelo están conformados de la siguiente forma:

- 2 rayos con 1 reflexiones (1 rayo en cada pared)
- 2 rayos con 2 reflexiones (1 rayo en cada pared)
- 2 rayos con 3 reflexiones (1 rayo en cada pared)
- 1 rayo con el recorrido y reflexiones transmisor-suelo-receptor
- 1 rayo con el recorrido y reflexiones transmisor-suelo-pared-receptor
- 1 rayo con el recorrido y reflexiones transmisor-pared-suelo-receptor
- 1 rayo sin reflexiones (LOS)

Para analizarlo un poco más a fondo, se muestra en la figura 5.14 la trayectoria de dos rayos (LOS y 1 reflexión), para poder explicar los factores que se consideran en este modelado de canal y posteriormente mostrar las ecuaciones de este modelo.

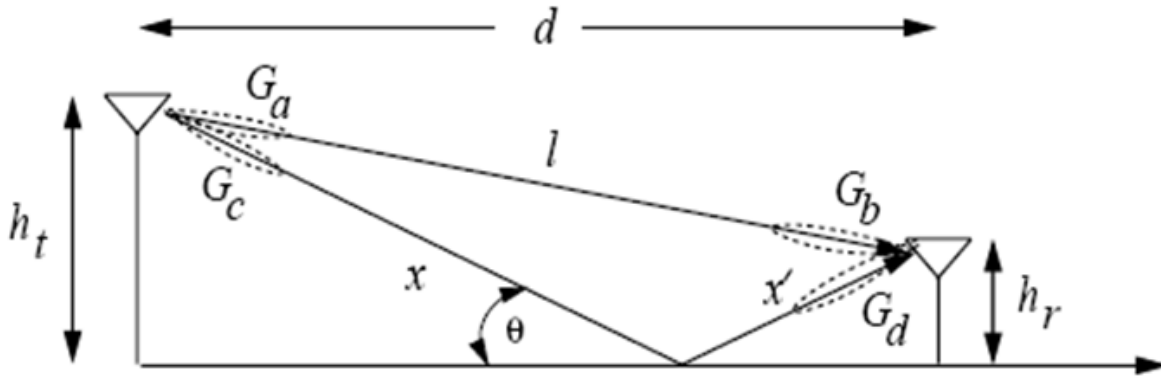


Figura 5.14. Modelo Ray Tracing de dos rayos

Donde d es la distancia existente entre transmisor y receptor, G_a y G_c son los patrones de radiación de la antena transmisora en el rayo de LOS y en el rayo con una reflexión respectivamente, G_b y G_d son los patrones de radiación de la antena receptora en el rayo de LOS y el rayo con una reflexión respectivamente, h_t es la altura al suelo en el que se encuentra el transmisor, h_r es la altura con respecto al suelo en el que se encuentra el dispositivo receptor, l es la distancia que recorre el rayo de LOS, X y X' es la distancia total recorrida por el rayo con reflexión y θ es el ángulo con el que se refleja uno de los rayos.

Con los parámetros de cada uno de los componentes explicados, en la ecuación 5.2 se mostrará la expresión matemática característica del modelo Ray Tracing de diez rayos.

$$Pr \approx P_t \left[\frac{\lambda}{4\pi} \right]^2 \left[\frac{\sqrt{G_t}}{l} + \frac{R_i \sqrt{G_{ri}} e^{-j\Delta\theta i}}{xi} \right]^2 \quad (5.2)$$

En donde P_t es la potencia de transmisión, $\sqrt{G_t}$ es el producto del patrón de radiación de las antenas transmisora y receptora en el rayo LOS (cuando las antenas son omnidireccionales como es nuestro caso, el valor de este producto es 1), $\sqrt{G_{ri}}$ es el producto del patrón de radiación de las antenas transmisora y receptora en el rayo reflejado (cuando las antenas son omnidireccionales como es nuestro caso, el valor de este producto es 1), λ es la longitud de onda de la señal, l es la distancia del rayo LOS, xi es la distancia total del rayo reflejado, $\Delta\theta$ es la fase de llegada de la señal expresada en la ecuación 5.3 y R es el coeficiente de reflexión el cual se determina con la ecuación 5.4.

$$\Delta\theta = 2\pi(X + X')/\lambda \quad (5.3)$$

Ahora se muestra el coeficiente de reflexión R

$$R \approx \frac{\sin(\theta) - Z}{\sin(\theta) + Z} \quad (5.4)$$

Donde Z es la polaridad de la antena la cual se determina con la ecuación 5.5 y 5.6.

$$Z \approx \sqrt{e - \cos(\theta)} / \epsilon_r \quad (5.5)$$

La ecuación 5.5 se utiliza cuando la polarización de la antena es vertical y ϵ_r es la constante dieléctrica del terreno, en el caso de entornos exteriores es de 15.

$$Z \approx \sqrt{e - \cos(\theta)} \quad (5.6)$$

La ecuación 5.6 se utiliza cuando la polarización de la antena es horizontal y al igual que la ecuación 5.5 ϵ_r es la constante dieléctrica del terreno, que en el caso de entornos exteriores es 15.

Se aplicó este modelado de canal se aplicó los experimentos realizados para determinar el máximo de cobertura en la Facultad de Ingeniería (experimentos con LOS y NLOS) y en la explanada principal del campus. En cada uno de los entornos se varió la distancia de las paredes; en el entorno de la Facultad de Ingeniería, para las mediciones con NLOS la distancia entre paredes fue de 26 metros, en el entorno de LOS la distancia entre paredes fue de 50 metros y finalmente la distancia entre paredes para el entorno de la explanada del campus fue de 100 metros. Considerando que entre más distancia haya entre las paredes, menor será la potencia de arribo de las multitrayectorias. En la figura 5.15 se muestra el resultado de esta simulación.

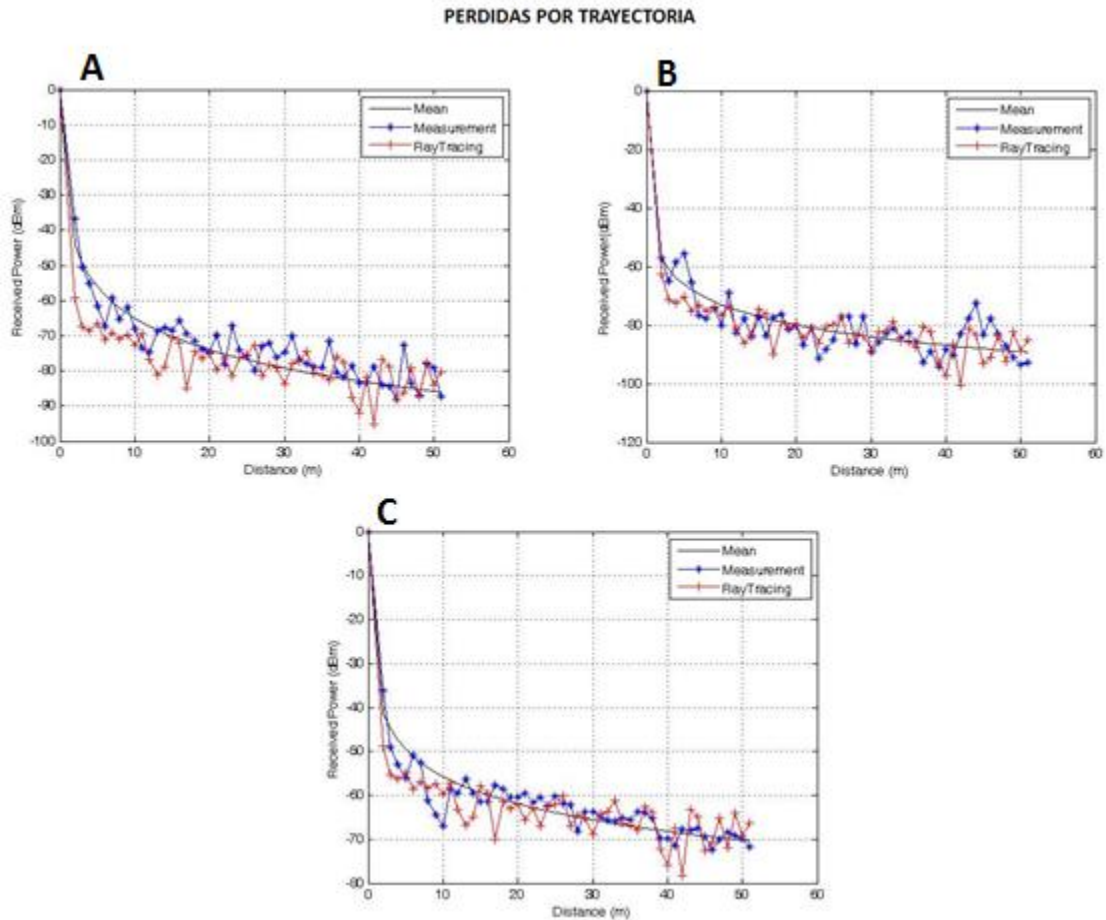


Figura 5.15. Resultados del modelo Ray Tracing de diez rayos

En todas las gráficas, la línea negra es la media de los valores, la cual se determina con la ecuación 5.1, la línea azul es la medición real (A y B en la Facultad de Ingeniería, con entorno LOS y NLOS respectivamente y C en la explanada principal del campus) y la línea roja es el resultado del modelado de canal Ray Tracing de 10 rayos.

Con esto, se ha adaptado dicho modelado de canal a nuestros entornos de propagación, por lo cual puede ser utilizado en cualquier entorno de propagación para el caso de la Universidad Autónoma de Baja California campus Mexicali sección ingenierías.

Así concluimos el capítulo 5, pasando al último capítulo de la tesis, la cual serán las conclusiones de este trabajo de investigación.

Referencias

- [1] Aleksandar Neskovic, Natasa Neskovic and George Paunovic, "Modeling of Mobile Radio Systems Propagation Environment", IEEE Communications Surveys, pp 2-12, 2000
- [2] J. Zheng and M. J. Lee, "Will IEEE 802.15.4 Make Ubiquitous Networking a Reality?: A Discussion on a Potential Low Power, Low Bit Rate Standard," *IEEE Communications Magazine*, Vol.42, No.6, pp. 140-146, june 2004.
- [3] IEEE, "IEEE Standard 802 Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks," pp. 1-670, 2003.

- [4] M. M. Holland, R. G. Aures, and W. B. Heinzelman, "Experimental Investigation of Radio Performance in Wireless Sensor Networks," in *Proceedings of IEEE Workshop on Wireless Mesh Networks*, Reston, Virginia, USA, pp. 140-150, september 2006.
- [5] J. Werb, M. Newman, V. Berry, S. Lamb, D. Sexton, and M. Lapinski, "Improved quality of service in IEEE 802.15.4 mesh networks," in *Proceedings of International Workshop Wireless and Industrial Automation*, San Francisco, CA, pp. 1-6, 2005.
- [6] L. Tang, K.-C. Wang, Y. Huang, and F. Gu, "Channel Characterization and Link Quality Assessment of IEEE 802.15.4-Compliant Radio for Factory Environments," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol.3, No.2, pp.99-110, may 2007.
- [7] Lei Tang, Kuang-Ching Wang, Yong Huang, and Fangming Gu, "Channel Characterization and Link Quality Assessment of IEEE 802.15.4-Compliant Radio for Factory Environments", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 3, No. 2, Mayo 2007.
- [8] Fitzhugh, Christopher, Jeff Frolik, Richard Ketcham, & John Covell. "Multipath fadings in Airframes at 2.4 GHz". *IEEE Wireless and Microwave Technology Conference*, 2005 (WAMICON 2005), Clearwater, Florida, 7-8 abril 2005, pp:162-165.
- [9] Emiliano Miluzzo, Xiao Zheng, Kristof Fodor and Andrew T. Campbell, "Radio Characterization of 802.15.4 and Its Impact on the Design of Mobile Sensor Networks", *EWSN 2008*, Berlin, pp: 171-188.
- [10] Jay Weitzen and Theodore Grosch, "Comparing coverage quality for femtocell and macrocell broadband data services" *IEEE Communications Magazine*, Vol.48, No.1, pp. 40-44, enero 2010.
- [11] Bo Hu y Beaulieu Norman; "Pulse Shaping in UWB Communication Systems"; *Proceedings IEEE Vehicular technology conference 2004*; vol.7; Septiembre 26-29 2004, Edmonton, Canada; pp5175-5179; ISSN:1090-3038.
- [12] Mark Yarvis, Konstantina Papagiannaki, and W. Steven Conner, "Characterization of 802.11 Wireless Networks in the Home", *Proceedings of the 1st workshop on Wireless Network Measurements (Winmee 2005)*, Riva del Garda, Italy, abril 2005.
- [13] Feng Chen, Nan Wang, Reinhard German and Falko Dressle, "Simulation study of IEEE 802.15.4 LR-WPAN for industrial applications" *Wireless Communications and Mobile Computing*, Vol.10, No.5, pp.609-621, enero 2009.
- [14] Ahmed Sobeih, Wei-Peng Chen, Jennifer C. Hou, Lu-Chuan Kung, Ning Li, Hyuk Lim, Hung-Ying Tyan, and Honghai Zhang, J-Sim, "A simulation and emulation

environment for wireless sensor networks,” IEEE Wireless Communications Magazine, Vol. 13, No. 4, pp. 104-119, agosto 2006.

[15] Jin-shyan Lee, “*Performance Evaluation of IEEE 802.15.4 for Low-Rate Wireless Personal Area Networks*,” IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol. 52, No. 3, pp.742-749, agosto 2006.

[16] K. Pahlavan and A. H. Levesque, “*Wireless Information Networks*”, New York, John Wiley & Sons, Inc., 1995.

[17] Andrea Goldsmith, “*Wireless Communications*”, Cambridge University Press, 2005, pp 29-33

[18] A Neskovic, N. Neskovic and D. Paunovic, “*Indoor Electric Field Level Prediction Model Based on the Artificial Neural Networks*”, IEEE COMML, vol 4, no. 6, Junio 2000

[19] A. Neskovic, “*Artificial Neural Network Indoor Radio Propagation Model (band 900 MHZ)*,” Master’s Thesis, Faculty of Electrical Engineering – Belgrado 1997

[20] A. M. Saleh, A. Valenzuela, “*A Statistical Model for Indoor Multipath Propagation*”, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol SAC-5, No 2, Febrero 1987.

[21] P. Harley, “*Short Distance Attenuation Measurements at 900 MHz and 1.8 GHz Using Low Antenna Heights for Microcells*”, IEEE JSAG, vol. 7 no. 1, Enero 1989.

[22] W.C.Y. Lee, “*Mobile Communications Design Fundamentals*”, John Wiley 1993.

[23] Y. Okumura et al. “*Field Strength and its Variability in VHF and UHF Land-Mobile Services*” Review Elec. Commun. Labs. Vol 16, Sept-Oct 1968, pp 825-837.

[24] Emanuele Cipollone, Francesca Cuomo, Sara Della Luna, Ugo Monaco, Francesco Vacirca, “*Topology Characterization and Performance Analysis of IEEE 802.15.4 Multi-Sink Wireless Sensor Networks*,” Sixth Annual Mediterranean Ad Hoc Networking WorkShop, Corfu, Greece, June 12-15, 2007, pp.196-203.

[25] A. Flammini, D. Marioli, G. Mazzoleni, E. Sisinni, and A. Taroni, “*Received Signal Strength Characterization for Wireless Sensor Networking*,” IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (IMT 2006), Sorrento, Italy 24-27 April 2006, pp. 207-211.

[26] IEEE 802.15.4-2003 Std for Information Technology., Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LRWPANs), 2003.

- [27] E. Callaway et al, “*Home Networking with IEEE 802.15.4: A Developing Standard for Low-Rate Wireless Personal Area Networks*,” IEEE Communications Magazine, Vol.40, No.8, Aug. 2002, pp. 69-77.
- [28] Jianliang Zheng and Myung J. Lee, “*Will IEEE 802.15.4 Make Ubiquitous Networking a Reality?: A Discussion on a Potential Low Power, Low Bit Rate Standard*,” IEEE Communications Magazine, Vol. 42, No.6 , June 2004, pp.140-145.
- [29] B. Bougard, F. Catthoor, D. C. Daly, A. Chandrakasan, and W. Dehaene, “*Energy Efficiency of the IEEE 802.15.4 Standard in Dense Wireless Microsensor Networks: Modeling and Improvement Perspectives*,” in Proceedings of Design, Automation and Test in Europe (DATE’05), vol. 1, no. 1, 2005, pp. 196–201.
- [30] I. Howitt and J. A. Gutierrez, “*IEEE 802.15.4 Low Rate – Wireless Personal Area Network Coexistence Issues*,” in Proceedings of WCNC, vol. 3, March 2003, pp. 1481–1486.
- [31] Andreas Willig, “Recent and Emerging Topics in Wireless Industrial Communications: A Selection”, IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol.4, No.2, may 2008, pp.102-124.
- [32] A. K. Arumugam, A. Doufexi, A. R. Nix, and P. N. Fletcher, “*An investigation of the coexistence of 802.11g WLAN and high data rate Bluetooth enabled consumer electronic devices in indoor home and office environments*,” IEEE Trans. Consum. Electron., vol. 49, no. 3, pp.587–596, Aug. 2003.
- [33] C.-F. Chiasserini and R. R. Rao, “*Coexistence mechanisms for interference mitigation in the 2.4-GHz ISM band*,” IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 2, no. 5, pp. 964–975, Sep. 2003.