



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**TELECOMUNICACIONES Y REDES**

**“EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL ESTÁNDAR IEEE 802.15.4  
(ZIGBEE) EN ENTORNOS DE INTERFERENCIA”**

**TESIS DE GRADO**

Previo a la obtención del Título de

**INGENIERO EN ELECTRÓNICA TELECOMUNICACIONES Y REDES**

Presentado por

**IRENE TUSTÓN TORRES**

Riobamba – Ecuador

2011

Mi más sincero y profundo agradecimiento:

A Dios Todopoderoso por regalarme el don de la vida. Por ser la luz principal que guía mi camino.

A mis padres Sixto y Estalina por brindarme su apoyo y amor incondicional. Por inculcar en mí con su ejemplo el espíritu de honestidad, lucha y perseverancia.

A mis hermanos Raquel, Maritza y Stalin por abrigarme desde pequeña con el calor de sus cuidados. Por sus consejos y sustento constante.

A todos mis amigos por su afecto sincero y amistad inquebrantable. Por acompañarme desde siempre en los buenos y malos momentos.

A Dany por su paciencia y cariño. Por la ayuda que me ha brindado y por la alegría que ha traído a mi vida.

A mi tutor Ing. Santiago Cisneros y colaborador Ing. Edwin Altamirano por sus aportes y valiosa contribución.

Dedico el esfuerzo que refleja la presente tesis a mis sobrinos: Tamia, Daniel, Didier, Renata y Dario. A ustedes pequeñitos, por dar sentido a mi vida con sus abrazos y alegría a mi corazón con sus sonrisas.

## FIRMAS RESPONSABLES Y NOTA

NOMBRE	FIRMA	FECHA
Ing. Iván Ménes <b>DECANO FACULTAD DE INFORMATICA Y ELECTRONICA</b>	_____	_____
Ing. Pedro Infante <b>DIRECTOR DE ESCUELA ING. EN ELECTRONICA TELECOMUNICACIONES Y REDES</b>	_____	_____
Ing. Santiago Cisneros <b>DIRECTOR DE TESIS</b>	_____	_____
Ing. Edwin Altamirano <b>MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE TESIS</b>	_____	_____
Tlgo. Carlos Rodríguez <b>DIRECTOR CENTRO DE DOCUMENTACION</b>	_____	_____

**NOTA DE LA TESIS:** \_\_\_\_\_

## **RESPONSABILIDAD DEL AUTOR**

“Yo Irene Tustón Torres, soy la responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en esta Tesis, y el patrimonio intelectual de la misma pertenecen a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO”.

---

Irene Tustón Torres

## ÍNDICE DE ABREVIATURAS

<b>ACK</b>	Acknowledgment, Acuse de Recibo
<b>AP</b>	Access Point, Punto de Acceso
<b>BSS</b>	Basic Service Sets, Conjunto de Servicios Básicos
<b>CONATEL</b>	Comisión Nacional para las Telecomunicaciones
<b>DSSS</b>	Direct Sequence Spread Spectrum, Espectro Expandido por Secuencia Directa
<b>EIRP</b>	Effective Isotropic Radiated Power, Potencia Efectiva Radiada Isotrópicamente
<b>ESS</b>	Extended Service Set, Conjunto de Servicios Extendidos
<b>ETSI</b>	European Telecommunications Standards Institute, Instituto Europeo de Estándares de Telecomunicaciones
<b>FCC</b>	Federal Communication Commission, Comisión Federal de Comunicaciones
<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronics Engineers, Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos
<b>IBSS</b>	Independent Basic Service Sets, Conjunto Independiente de Servicios Básicos
<b>IP</b>	Internet Protocol, Protocolo de Internet
<b>ISM</b>	Industrial, Scientific and Medical, Bandas en áreas Industrial, Científica y Médica
<b>ITU</b>	International Telecommunication Union,
<b>MAC</b>	Media Access Control, Control de Acceso al Medio
<b>OFDM</b>	Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales, Orthogonal Frequency Division Multiplexing
<b>OSI</b>	Open System Interconnection, Interconexión de Sistemas Abiertos
<b>WAN</b>	Wide Area Network, Red de Área Amplia
<b>Wi-Fi</b>	Wireless Fidelity, Fidelidad Inalámbrica
<b>WLAN</b>	Wireless Local Area Network, Red de Área Local Inalámbrica
<b>WPAN</b>	Wireless Personal Area Networks, Red Inalámbrica de Área Personal
<b>WSN</b>	Wireless Sensor Network, Red de Sensores Inalámbricos

# ÍNDICE GENERAL

**PORTADA**

**AGRADECIMIENTO**

**DEDICATORIA**

**ÍNDICES**

**INTRODUCCIÓN**

## **CAPÍTULO I**

**MARCO REFERENCIAL ..... 16**

1.1 ANTECEDENTES ..... 16

1.2 JUSTIFICACIÓN ..... 18

1.3 OBJETIVOS ..... 19

1.3.1 Objetivo General ..... 19

1.3.2 Objetivos Específicos ..... 20

1.4 HIPÓTESIS ..... 20

## **CAPÍTULO II**

**MARCO TEÓRICO ..... 21**

2.1 DESCRIPCIÓN DEL ESTÁNDAR IEEE 802.11 ..... 21

2.1.1 Arquitectura Wlan IEEE 802.11 ..... 24

2.1.1.1 Independent Basic Service Sets (IBSS) ..... 24

2.1.1.2 Basic Service Sets (BSS) ..... 25

2.1.1.3 Extended Service Set (ESS) ..... 26

2.1.2 Capa Física o PHY ..... 27

2.1.3 Nivel de Acceso al Medio (Media Access Control MAC) ..... 29

2.1.3.1 Función de Coordinación Distribuida (DCF) ..... 30

2.1.3.2 Espaciado entre tramas IFS ..... 33

2.1.3.3 Función de Coordinación Puntual (PCF) ..... 35

2.1.4 Formato de las tramas MAC ..... 37

2.2 DESCRIPCIÓN DEL ESTÁNDAR IEEE 802.15.4 (ZIGBEE) ..... 39

2.2.1 Definición de canal ..... 43

2.2.2 Topologías ZigBee ..... 45

2.2.3	Arquitectura ZigBee .....	47
2.2.4	Dispositivos ZigBee .....	51
2.3	ERRORES E INTERFERENCIA .....	53
<b>CAPÍTULO III</b>		
<b>MARCO METODOLÓGICO E HIPOTÉTICO .....</b>		<b>56</b>
3.1	TIPO DE INVESTIGACIÓN .....	56
3.2	SISTEMA DE HIPÓTESIS .....	58
3.3	OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES .....	59
3.3.1	Operacionalización Conceptual .....	59
3.3.2	Operacionalización Metodológica .....	61
3.3.3	Conceptualización de los índices .....	63
3.4	POBLACIÓN Y MUESTRA .....	67
3.5	PROCEDIMIENTOS GENERALES .....	68
3.6	INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS .....	68
3.7	VALIDACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS .....	69
3.8	AMBIENTE DE SIMULACIÓN .....	71
<b>CAPITULO IV</b>		
<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>		<b>76</b>
4.1	PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN .....	76
4.2	RESUMEN DE LOS EXPERIMENTOS DE EVALUACIÓN DE INTERFERENCIA .....	77
4.2.1	Análisis de los resultados del experimento 1 y 2 .....	78
4.2.2	Análisis de los resultados del experimento 3 .....	91
4.3	RESUMEN DE LAS EQUIVALENCIAS DE LOS PESOS PARA INDICADORES DE LA VARIABLE INDEPENDIENTE ..	96
4.4	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	98
4.4.1	Variable Independiente .....	98
4.4.2	Variable Dependiente .....	99
4.5	PRUEBA DE LA HIPÓTESIS .....	99
<b>CAPITULO V</b>		
<b>MARCO PROPOSITIVO .....</b>		<b>105</b>
5.1	IMPLEMENTACIÓN DE LA RED ZIGBEE 802.15.4 .....	105



5.1.1	Descripción de los módulos RF ZigBee .....	105
5.1.2	Modos de operación de los módulos XBee .....	112
5.1.2.1	Transmit Mode (Modo de Transmisión) .....	112
5.1.2.2	Receive Mode (Modo de Recepción) .....	112
5.1.2.3	Sleep Mode (Modo de Bajo Consumo) .....	113
5.1.2.4	Command Mode (Modo de Comando) .....	114
5.1.2.5	Ide Mode .....	114
5.1.3	Configuración de los módulos XBee .....	115
5.1.3.1	Software X-CTU .....	115
5.1.3.2	Programación de los módulos XBee .....	116
5.2	ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN .....	119
5.2.1	Regulaciones y Normas .....	119
5.2.2	Uso y prácticas .....	122
5.2.3	Acercamientos técnicos .....	123
5.2.4	Bandas de frecuencia alternas .....	125
5.3	PROPUESTA DE LA SOLUCIÓN DE INTERFERENCIA ZIGBEE SOBRE WIFI EN LA BANDA DE 2.4 GHZ .....	125
5.3.1	Diseño .....	128
5.3.2	Cálculos .....	130
5.3.3	Filtro con Stubs .....	132

## **CONCLUSIONES**

## **RECOMENDACIONES**

## **RESUMEN**

## **SUMARY**

## **GLOSARIO**

## **BIBLIOGRAFÍA**

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura I.I. Ambiente de simulación ZigBee	19
Figura II.I. Canales en la banda de 2.4 GHz	22
Figura II.II. Conjunto Independiente de Servicios Básicos	24
Figura II.III. Conjunto de Servicios Básicos	25
Figura II.IV. Conjunto de Servicios Extendidos	30
Figura II.V. Arquitectura MAC	33
Figura II.VI. Problema de nodos escondidos y expuestos	33
Figura II.VII. Espaciado entre tramas IFS	34
Figura II.VIII. Función de Coordinación Puntual	35
Figura II.IX. Transmisión CF-Polls	36
Figura II.X. Trama MAC genérica	37
Figura II.XI. Campos de Control de Trama	38
Figura II.XII. Grupos de aplicaciones en la mira de ZigBee	41
Figura II.XIII. Espectro radioeléctrico	43
Figura II.XIV. Espectro de ocupación en las bandas del protocolo 802	45
Figura II.XV. Topologías ZigBee	45
Figura II.XVI. Campos de los cuatro tipos de paquetes básicos de ZigBee	48
Figura II.XVII. Seguridad en MAC	51
Figura III.I. Ambiente de simulación Experimental	71
Figura III.II. Ambiente de Simulación	72
Figura IV.I. Comparación de paquetes transmitidos en el experimento 1 y 2	79
Figura IV.II. Porcentaje de paquetes transmitidos en el experimento 1 y 2	79
Figura IV.III. Comparación paquetes por segundo del experimento 1	80
Figura IV.IV. Análisis de resultados Índice 2	81
Figura IV.V. Análisis de resultados Variable Dependiente, Indicador 1	83
Figura IV.VI. Comparación de la velocidad de tx en el experimento 1 y 2	85
Figura IV.VII. % Comparación de la velocidad de tx en el experimento 1 y 2	85
Figura IV.VIII. Comparación del Tiempo de tx en el experimento 1 y 2	86
Figura IV.IX. Porcentajes del Tiempo de tx en el experimento 1 y 2	87
Figura IV.X. Jitter en el experimento 1 y 2	88

Figura IV.XI. Porcentajes de Jitter en el experimento 1 y 2	89
Figura IV.XII. Análisis de resultados Variable Independiente, Indicador 2	90
Figura IV.XIII. Diagrama de utilizaciones de canal de Wifi	93
Figura IV.XIV. Diagrama de amplitud de espectro de Wifi	93
Figura IV.XV. Barras de los resultados de la Variable Independiente	98
Figura IV.XVI. Diagrama de fijación del nivel de significación	104
Figura V.I. Conexiones mínimas requeridas para el Xbee	111
Figura V.II. Modos de operación del modulo Xbee	112
Figura V.III. Ventana del software X-CTU	116
Figura V.IV. Función Mode Configuration	117
Figura V.V. Parámetros S simulados del Filtro con Stubs	133

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I.I. Características principales de ZigBee	40
Tabla II.II. Banda de frecuencias para las redes inalámbricas	44
Tabla II.III Dispositivos ZigBee	51
Tabla III.I. Operacionalización Conceptual de las variables del proyecto	59
Tabla III.II. Operacionalización Metodológica de las variables del proyecto	61
Tabla III.III Detalles Técnicos de los equipos del Ambiente de Simulación	72
Tabla IV.I. Comparación de paquetes transmitidos en el experimento 1 y 2	79
Tabla IV.II. Análisis de resultados Índice 2	80
Tabla IV.III. Análisis de resultados Variable Dependiente, Indicador 1	83
Tabla IV.IV. Comparación de la velocidad de tx en el experimento 1 y 2	84
Tabla IV.V. Comparación de velocidad de tx en el experimento 1 y 2	84
Tabla IV.VI. Comparación del Tiempo de tx en el experimento 1 y 2	86
Tabla IV.VII. Porcentajes del Tiempo de tx en el experimento 1 y 2	87
Tabla IV.VIII. Jitter en el experimento 1 y 2	88
Tabla IV.IX. Porcentajes Jitter en el experimento 1 y 2	88
Tabla IV.X. Análisis de resultados Variable Independiente, Indicador 2	90
Tabla IV.XI. Análisis de resultados Variable Dependiente, Indicador 3	92
Tabla IV.XII. Análisis de resultados de utilización del espectro Variable Dependiente, Indicador 3	85
Tabla IV.XIII. Análisis de resultados de utilización del espectro Variable Dependiente, Indicador 3	85
Tabla IV.XIV. Pesos de los indicadores de la variable Independiente	97
Tabla IV.XV. Análisis de Resultados V. Independiente: Total Indicadores	98
Tabla IV.XVI. Matriz de Valores Observados	101
Tabla IV.XVII. Matriz de Valores Esperados	102
Tabla IV.XVIII. Prueba de la Hipótesis, valores del test de Chi-cuadrado	102
Tabla V.I. Especificaciones técnicas de los módulos	107
Tabla V.II. Descripción de pines de los módulos Xbee	110
Tabla V.III. Bandas de MDBA	121
Tabla V.IV. Potencias permitidas para MDBA	122

Tabla V.V. Valores de los elementos para filtros Chebyshev 0.5 db	130
Tabla V.VI. Cálculos del Filtros Microstrip	132

## INTRODUCCIÓN

La actual tendencia en el ámbito mundial en el área de las comunicaciones personales se orienta hacia la utilización de sistemas de comunicación inalámbricos portátiles con alta velocidad de conexión y elevado nivel de seguridad. Concretamente se ha difundido la comunicación de dispositivos con tecnologías inalámbricas de acceso personal (WPAN) y acceso local (WLAN) como es el caso de ZigBee y WIFI respectivamente.

Una de las principales preocupaciones de la IEEE es la coexistencia de ZigBee con IEEE 802.11b (Wifi), ya que ambos utilizan la misma porción del espectro, y tienen mecanismos de transmisión similares.

ZigBee y Wi-Fi comparten la misma banda de 2.4 GHz, la cual bajo las regulaciones de Federal Communications Commission (FCC), se extiende de 2.4 hasta 2.4835 GHz. Sin embargo estos sistemas deben operar bajo ciertas restricciones cuyo propósito es permitir que varios sistemas coexistan en tiempo y espacio.

A diferencia de otras tecnologías, ZigBee utiliza DSS (espectro extendido de frecuencia directa), es decir realiza las comunicaciones a través de una única frecuencia, es decir de un canal, normalmente puede escogerse un canal de entre 16 posibles. Su alcance en ambientes exteriores es de 100m y en interiores de unos 30m. La velocidad de transmisión de datos es de hasta 256kbps, y está preparado para poder controlar en una misma red una cantidad enorme de dispositivos.

IEEE 802.11b (Wi-Fi) usa 22 MHz de ancho de banda (pasabanda) para transmitir a velocidades de hasta 11 Mb/s. Un máximo de tres redes Wi-Fi pueden coexistir sin interferir la una con la otra, dado que solo tres de esos canales de 22 MHz pueden encajar en la banda sin solapamiento. Sin embargo sin importar en la porción de la banda donde Wi-Fi opere, compartir con ZigBee es inevitable. Dos sistemas inalámbricos compartiendo la misma banda de frecuencia pueden potencialmente interferir el uno con el otro.

El propósito de esta tesis es presentar un análisis comparativo del funcionamiento respectivo de las tecnologías WLAN y WPAN, las tendencias y análisis de soluciones al problema de interferencia causado por la proximidad y la operación simultánea de las redes WPAN y WLAN para permitir una mejora en la fiabilidad de la coexistencia de estas tecnologías, colisiones de tiempo y frecuencia en las transmisiones.

# **CAPÍTULO I**

## **MARCO REFERENCIAL**

### **1.1 ANTECEDENTES**

Con el paso del tiempo las redes de sensores inalámbricas han ido evolucionando debido al espectro de banda libre utilizado y a la demanda de nuevas necesidades por parte del sector de las telecomunicaciones. Estas redes resultan atractivas al no necesitar cableado para su instalación, hecho que produce un coste más económico respecto a los despliegues de otras tecnologías. Otra ventaja a destacar aparte del cableado, es el bajo coste de comunicación debido al uso de frecuencias sin licencia y su sencilla infraestructura, que favorece aún más el bajo consumo.

Los canales de los que se dispone para repartir esta diversidad de tecnologías está limitado y por lo tanto, el efecto de interferencias producidas entre ellas es un factor muy común. Estas obstrucciones producen la colisión de los paquetes dando lugar



a errores y un cambio en el comportamiento de los dispositivos, causando una disminución de la velocidad de transmisión.

La existencia de esta diversidad tecnológica provoca que todas las redes que comparten el mismo espacio radioeléctrico deban convivir influenciadas por las demás. Su uso en entornos domésticos o industriales encuentra dificultades en su expansión debido a la sobreexplotación de las bandas de frecuencia donde se encuentran.

Un ejemplo de ello es ZigBee, una tecnología de comunicaciones inalámbricas basado en el estándar IEEE 802.15.4 de redes inalámbricas de área personal (WPAN), que opera en las bandas libres de 2.4Ghz, 858Mhz para Europa y 915Mhz para Estados Unidos. Sus transmisiones han de compartir el espectro en numerosos casos con tecnologías como Wifi o Bluetooth, que se caracterizan por utilizar mayores potencias de transmisión y anchos de banda más grandes.

En el caso de las transmisiones Wifi, podemos decir que al estar situadas dentro del área de cobertura de una red IEEE 802.15.4, producirán interferencias dando lugar como resultado, a la disminución de la tasa de transmisión de ZigBee. Los principales factores Wifi que producirán este efecto sobre ZigBee son el tipo de modulación utilizada, el tamaño de los paquetes, la tasa de transferencia y el nivel de potencia. Variando estas propiedades de Wifi, se podrán conseguir tasas de transmisión de datos aceptables para el correcto funcionamiento de las redes de sensores ZigBee.

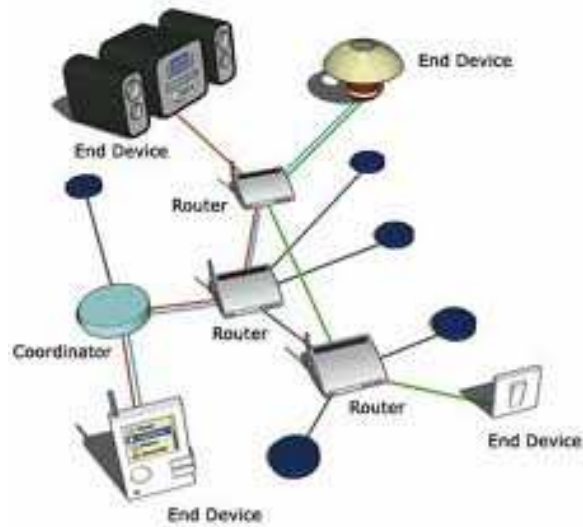
## 1.2 JUSTIFICACIÓN

La principal motivación detrás del desarrollo del presente proyecto es estudiar los posibles perjuicios debido a la coexistencia de diferentes tecnologías en un mismo entorno, normalmente de oficinas o doméstico, pero también en espacios exteriores.

La visión del proyecto se centran en la obtención de resultados cuya información nos indique en qué grado se ven afectadas las transmisiones en una red de sensores basada en IEEE 802.15.4 en entornos ruidosos, sobre todo debido a la presencia de dispositivos que funcionen con tecnología Wifi.

Los resultados serán producto de una evaluación previa de parámetros como el retardo, jitter, pérdida de paquetes, tiempos de transmisión, utilizando sniffers inalámbricos como el Kismet. Además, se medirá la utilización del canal valorando los espectros tanto de ZigBee como Wifi, u otras fuentes de interferencias, sean estas Bluetooth, hornos microondas o teléfonos inalámbricos, para ello utilizaremos un analizador de espectros a nivel de capa física armando un ambiente de simulación similar al mostrado a continuación en la Figura I-I.

.



*Figura I-I. Ambiente de simulación ZigBee*

La finalidad primordial de este proyecto será proponer parámetros idóneos para contribuir a la obtención de la máxima eficacia de la transmisión ZigBee, contrarrestando las interferencias de dispositivos ajenos.

Conjuntamente se generará el material de estudio necesario para la Escuela de Ingeniería Electrónica Telecomunicaciones y Redes, en lo que respecta a la Tecnología ZigBee.

### **1.3 OBJETIVOS**

#### **1.3.1 Objetivo General**

Evaluar el rendimiento del estándar IEEE 802.15.4 (ZigBee) en entornos de interferencia.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Implementar una red de sensores con tecnología ZigBee para conocer más sobre su estructura y funcionamiento.
- Analizar los problemas en la coexistencia de tecnologías en la misma área de cobertura de una red IEEE 802.15.4.
- Proponer soluciones para mejorar el rendimiento en la transmisión ZigBee en entornos de interferencia en la Banda de 2,4 GHz.

### 1.4 HIPÓTESIS

*Mediante la evaluación de los problemas de interferencia en la transmisión ZigBee, se pretende proponer soluciones a estos problemas de modo que se pueda asegurar la coexistencia con dispositivos de otras tecnologías.*

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 DESCRIPCIÓN DEL ESTÁNDAR IEEE 802.11 (WIFI)**

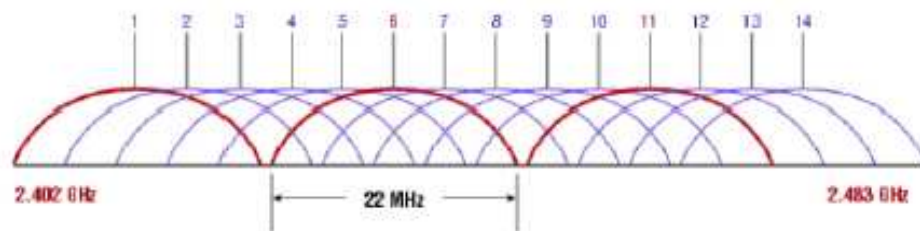
El estándar 802.11 o también llamado Wifi fue definido por el IEEE (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos) en 1997 con el propósito de reemplazar la conexión alámbrica Ethernet.

La primera extensión es 802.11 a, opera en la banda de 5Ghz, menos congestionada y con menos interferencias y con un alcance limitado a 50m, con 12 canales de frecuencia separados. Como resultado, se disponen de 12 puntos de acceso para diferentes canales en la misma área sin interferencia.

El 802.11a, utiliza división de frecuencias ortogonales multiplexadas (OFDM), la cual divide una señal de datos a través de 48 portadoras separadas con un canal de 20 Mhz para proveer transmisiones en rangos de 6, 9 12, 18, 24, 36, 48 o 54 Mbps.

La segunda extensión es 802.11b y es la base de la mayoría de LAN's inalámbricas que existen en la actualidad, opera en la banda de 2.4 Ghz y utiliza DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) con modulación CCK (Complementary Code Keying) para dispersar la señal de datos sobre una porción aproximadamente de 30 Mhz. Los rangos de datos que soporta 802.11 b son 1, 2, 5.5 y 11 Mbps.

La Capa Física del estándar especifica el uso de modulación DSSS en la banda de 2.4 GHz, el ancho de banda de 83.5 MHz se dividió en 11 canales de 22 MHz, los cuales se solapan entre sí (*ver Figura II.I*), existiendo solamente 3 canales independientes (canal 1, 6 y 11).



*Figura II.I. Canales en la banda de 2.4 GHz*

Los niveles de potencia permitidos varían de acuerdo a la región en que nos encontremos, en Estados Unidos de América la FCC permite niveles de hasta 36 dbm para la potencia efectiva radiada isotropicamente (en inglés Effective Isotropic Radiated Power -EIRP-), en Europa el Instituto Europeo de Estándares de Telecomunicaciones

(en inglés European Telecommunications Standards Institute -ETSI-) establece el nivel máximo para la EIRP en 20 dbm, mientras que para Ecuador la Comisión Nacional para las Telecomunicaciones (CONATEL) permite una EIRP máxima de 30 dBm. La siguiente ecuación muestra como calcular la EIRP dada la ganancia de la antena transmisora y la potencia transmitida.

$$EIRP [dBm] = G_t [dB] + P_{Tx} [dBm] \quad (2.1)$$

La tercera extensión y de las más recientes es 802.11g, de forma similar que 802.11b opera en la banda de 2.4 Ghz y las señales transmitidas utilizan aproximadamente 30 Mhz, lo que es un tercio de la banda. Esto limita el número de puntos de acceso 802.11g no empalmados a tres, lo cual es lo mismo que 802.11b. El estándar 802.11g es compatible con el 802.11b, capaz de alcanzar una velocidad doble, decir 22Mbits/s o llegar incluso a 54 Mbits/s para competir con los otros estándares que prometen velocidades mucho más elevadas pero incompatibles con equipos 802.11b ya instalados, aunque pueden coexistir en el mismo entorno debido a que las bandas de frecuencias que emplean son distintas.

El estándar IEEE 802.11 define los protocolos de las capas del método de acceso al medio (Media Access Control MAC) mediante escucha pero sin detección de colisión (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) y la capa física (PHY) para una LAN con conectividad inalámbrica. El estándar WLAN define el establecimiento de una red de área local donde los dispositivos conectados se comunican a través de

radiofrecuencias a otros dispositivos que estén muy próximos uno del otro, es decir se está hablando de un estándar similar en la mayoría de los aspectos al de Ethernet 802.3.

A continuación se revisa la arquitectura de la capa de nivel físico, se describe el funcionamiento de la capa de convergencia, fundamentalmente resaltando el proceso de transmisión y recepción de las técnicas de modulación utilizadas por 802.11 y 802.11b.

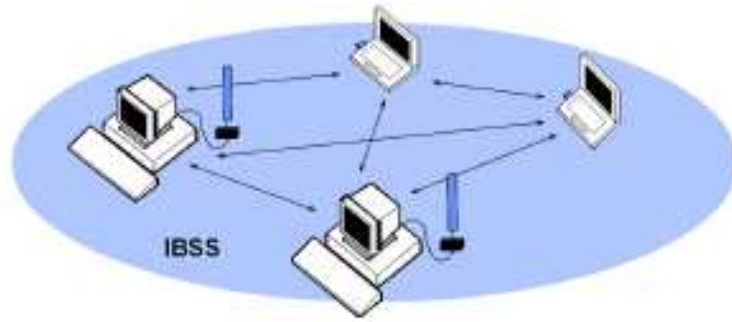
### **2.1.1 Arquitectura Wlan IEEE 802.11**

El estándar contempla tres topologías de red básicas:

#### **2.1.1.1 Independent Basic Service Sets (IBSS)**

Consiste en un grupo de estaciones que se comunican entre sí directamente sin necesidad de un AP, cada estación debe estar dentro del rango de señal de la otra para poder establecer la comunicación, estas redes no tienen dispositivos para su administración, por lo que una de las estaciones se encargará de realizar ésta tarea. La topología IBSS se usa frecuentemente para compartir datos en reuniones o conferencias, las mismas son equivalentes a las redes Ad-Hoc. En la figura se observa una red donde las terminales utilizan esta topología, como se puede observar en la *Figura II.11* la comunicación se realiza directamente de un equipo a otro.





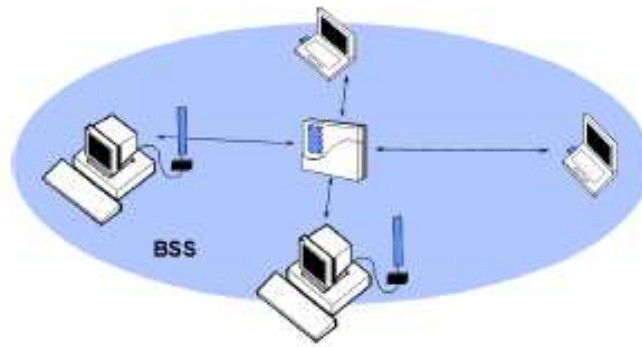
*Figura II.II. Conjunto Independiente de Servicios Básicos*

### **2.1.1.2 Basic Service Sets (BSS)**

Se basa en un conjunto de estaciones que se comunican entre sí por medio de un AP, el cual se encarga de realizar las tareas de administración de la red. En este tipo de topología cada terminal debe asociarse a la red, en este proceso el AP verifica si la terminal tiene permiso de unirse a la red y decide si la asocia o no. Una de las ventajas que presenta el uso de un AP, es que este puede percatarse de que la estación ha entrado al modo de ahorro de energía (en inglés Power Save) y guardar los paquetes de dicho equipo en memoria hasta que el equipo se active nuevamente.

Cada red BSS tiene un Service Set ID (SSID) o nombre de red que la identifica, este permite diferenciar redes que se encuentran en una misma zona geográfica. El SSID es publicado por el AP y se muestra al usuario de la terminal móvil.

Las redes BSS son equivalentes a las redes de infraestructura explicadas en el capítulo anterior. En la *Figura II.III* se aprecia como cada uno de los equipos pertenecientes a la red envía sus paquetes al AP.

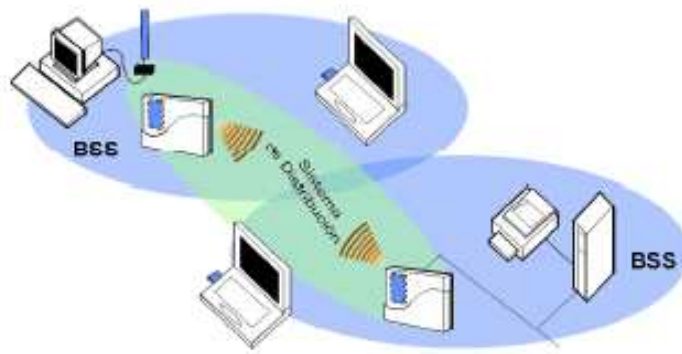


*Figura II.III. Conjunto de Servicios Básicos*

### **2.1.1.3 Extended Service Set (ESS)**

Se trata de un grupo de redes BSS conectadas entre sí mediante un sistema de distribución (en inglés Distribution System DS), la conexión de las redes BSS se puede realizar por medios cableados o inalámbricos, de esta manera se logran cubrir áreas geográficas mayores a las obtenidas mediante redes BSS o IBSS. En este tipo de red se puede presentar solapamiento de señales de distintos AP (cada BSS debe poseer un AP), por lo que se debe seleccionar la frecuencia de operación de cada AP de tal manera de no interferir con las redes BSS adyacentes.

Las estaciones pueden desplazarse a través de toda la red ESS sin preocuparse por perder la conexión, ya que esta se comporta como una red única, gracias a que los AP se encargan de las tareas de administración necesarias para conectar la terminal móvil al AP de la celda a la cual se está mudando. En la *Figura II.IV* se puede ver como el área de cobertura de la red aumenta gracias al uso de dos AP.



*Figura II.IV. Conjunto de Servicios Extendidos*

La capa física proporciona una serie de servicios a la capa MAC o capa de acceso al medio. Diferentes tecnologías de capa física se definen para transmitir por medio inalámbrico.

### **2.1.2 Capa Física o PHY**

La Capa Física establece las especificaciones que permiten transformar los paquetes de datos provenientes de la Capa MAC en señales eléctricas analógicas apropiadas para ser transmitidas al medio, que en este caso es el aire. También debe realizar el proceso inverso cuando se recibe información, es decir, captar señales presentes en el aire y transformarlas en paquetes de datos binarios que serán entregados a la Capa MAC.

La capa física de servicios consiste en dos protocolos:

- ◆ *Una función de convergencia de capa física*, que adapta las capacidades del sistema físico dependiente del medio (PMD). Esta función es implementada por

el protocolo PLCP<sup>1</sup>, que define una forma de mapear MPDUs<sup>2</sup>, en un formato de tramas susceptibles de ser transmitidas y recibidas entre diferentes estaciones a través de la capa PMD.

- ◆ *Un sistema PMD*, cuya función define las características y un medio de transmitir y recibir a través de un medio sin cables entre dos o más estaciones.

La comunicación entre MAC's de diferentes estaciones se realizará a través de la capa física de una serie de puntos de acceso al servicio, donde la capa MAC invocará las primitivas de servicio.

Además de estas capas, se puede distinguir la capa física de gestión. En esta capa podemos distinguir la estructura MIB (Base de datos de la información de gestión), que contienen las variables de gestión, los atributos, las acciones y las notificaciones requeridas para administrar una estación.

La modulación de una señal se realiza en dos etapas, una en bandabase y la otra en pasabanda. En la primera se realiza la codificación de línea, la cual consiste en tomar los PDU y convertirlos en formas de onda binarias utilizando algún tipo de código de línea (Manchester, NRZ, Bipolar etc.), el espectro de la señal resultante se encuentra contenido en frecuencias muy bajas, alrededor de 0 Hz.

En la segunda etapa se lleva a cabo la modulación pasabanda, ésta consiste en mapear la forma de onda binaria en una portadora de alta frecuencia, con esto se logra elevar la

---

<sup>1</sup> Procedimiento de convergencia de la capa física.

<sup>2</sup> Unidades de datos MAC

frecuencia de la señal resultante para así poder transmitirla haciendo uso de antenas de tamaños físicamente realizables<sup>3</sup>.

Existen diferencias importantes a nivel de Capa Física entre un medio cableado y uno inalámbrico, a continuación se mencionan algunas diferencias de los medios inalámbricos:

- ◆ Las transmisiones no están protegidas de señales externas.
- ◆ El medio es menos confiable, su función de transferencia varía.
- ◆ La topología de la red es dinámica.
- ◆ La atenuación es elevada y varía de acuerdo al lugar de emplazamiento de la red.
- ◆ No se puede garantizar que una estación detecte las transmisiones de las demás estaciones, a pesar de que estas pertenezcan al mismo dominio de colisión, esto genera el problema del nodo escondido.
- ◆ Las colisiones no se pueden detectar debido al amplio rango de valores que toman las señales en el medio.

### **2.1.3 Nivel de Acceso al Medio (Media Access Control MAC)**

Los métodos de acceso IEEE 802 están diseñados según el modelo OSI y se encuentran ubicados en el nivel físico y en la parte inferior del nivel de enlace o subnivel MAC.

La arquitectura MAC del estándar 802.11 (*ver Figura II.V*) se compone de dos funcionalidades:

---

<sup>3</sup> Se utilizan varios tipos de modulación digital para realizar este proceso (QAM, BPSK, etc.).

- ♦ La función de coordinación distribuida (DCF)
- ♦ La función de coordinación Puntual (PCF)

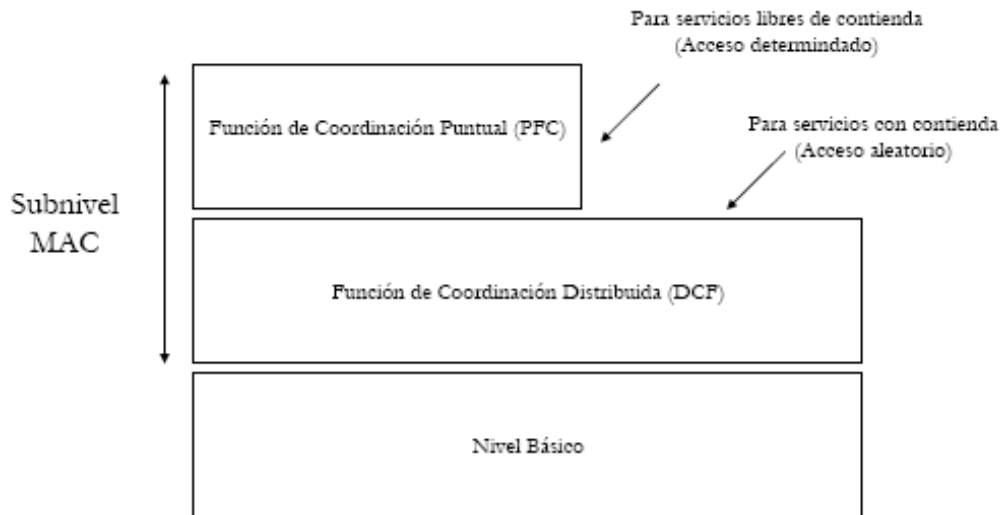


Figura II.V. Arquitectura MAC

### 2.1.3.1 Función de Coordinación Distribuida (DCF)

Se define como Función de coordinación distribuida (Distributed Coordination Function) como la funcionalidad que determina, dentro de un conjunto básico de servicios (BSS)<sup>4</sup>, cuando una estación puede transmitir y/o recibir unidades de datos de protocolo a nivel MAC a través del medio inalámbrico. En el nivel inferior del subnivel MAC se encuentra la función de coordinación distribuida y su funcionamiento se basa en técnicas de acceso aleatorias de contienda por el medio. El tráfico que se transmite es asíncrono ya que estas técnicas de contienda introducen retardos aleatorios y no predecibles ni tolerados por servicios síncronos.

<sup>4</sup> Conjunto de estaciones compitiendo por el medio inalámbrico, incluyendo necesariamente un Access Point.

Las características DCF se resumen como las siguientes:

- ◆ Utiliza el algoritmo MACA<sup>5</sup> como protocolo de acceso al medio.
- ◆ Uso de Acuses de recibo ACK's, provocando retransmisiones si no se reciben.
- ◆ Utiliza el campo Duration/ID que contiene el tiempo de reserva para transmisión y ACK. Esto quiere decir que todos los nodos sabrán al escuchar el canal cuando vuelva a quedar libre.
- ◆ Implementa fragmentación de datos.
- ◆ Concede prioridad a tramas mediante es espaciado entre tramas (IFS)<sup>6</sup>
- ◆ Soporta Broadcast y Multicast sin ACK's
- ◆ Protocolo de Acceso al medio CSMA/CA y MACA

El algoritmo básico de acceso a este nivel es muy similar al implementado en el estándar IEEE 802.3 y funciona como se describe a continuación:

1. Antes de transmitir información a una estación se debe sensar el medio para determinar si se encuentra ocupado.
2. Si el medio no está ocupado por ninguna trama la estación ejecuta una acción adicional llamada espaciado entre tramas (IFS)
3. Si durante este intervalo de tiempo (IFS), o bien desde el principio, el medio determina ocupado entonces la estación debe esperar hasta el final de la transmisión actual antes de realizar cualquier acción.

---

<sup>5</sup> Múltiple Access Control Avoidance, el transmisor y el receptor intercambian tramas de control antes que el transmisor envíe algún dato.

<sup>6</sup> Inter Frame Space Conjunto de retardos que configuran un esquema de prioridades.

4. Una vez finalizada esta acción como consecuencia del medio ocupado ejecuta el algoritmo de backoff según el cual se determina una espera adicional y aleatoria escogida uniformemente en un intervalo llamado ventana de contención (cw). El algoritmo de backoff nos da ranuras temporales y su función es la de reducir la probabilidad de colisión que es máxima cuando varias estaciones están esperando a que el medio quede libre para transmitir.
5. Mientras se ejecuta esta espera se continúa escuchando el medio de tal manera que si el medio se determina libre durante un tiempo de al menos IFS esta espera va avanzando hasta consumir todas las ranuras temporales asignadas. De lo contrario si el medio no permanece libre durante un tiempo igual o superior a IFS el algoritmo de backoff queda suspendido hasta que se cumpla la condición.<sup>7</sup>

Sin embargo, CSMA/CA en un entorno inalámbrico presenta dos problemas:

**Nodos Ocultos:** Una estación cree que el canal está libre pero en realidad esta ocupado por otro nodo que no escucha (*ver Figura II.VI*), suponiendo que A y C quieren comunicarse cada uno envía una trama, A y C tienen conocimiento que sus señales no tienen ese alcance las dos tramas colisionan en B pero ninguna de las estaciones lo saben.

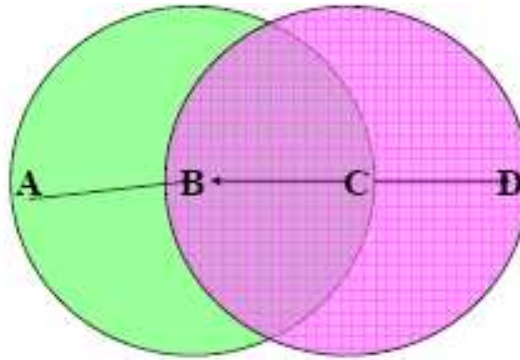
**Nodos Expuestos:** Una estación cree que el canal está ocupado, pero en realidad está libre pues el nodo al que oye no le interferiría para transmitir a otro destino, como

---

<sup>7</sup> Cada retransmisión provocará que el valor de cw se duplique.



podemos observar en la *Figura II.VI*. Suponiendo que B envía tramas a A, C está consciente de la transmisión por que escucha a B, sería un error que C concluya que no puede transmitir por ejemplo tramas hacia D ya que estas no interferirían con la transmisión entre A y B.



*Figura II.VI. Problema de nodos escondidos y expuestos*

La solución que se propone en 802.11 es el algoritmo llamado MACA.

La idea es que antes de transmitir el emisor envía una trama RTS (Request to Send), indicando la longitud de datos que quiere enviar. El receptor le contesta con una trama CTS (Clear to Send), replicando la longitud. Al recibir CTS el emisor envía sus datos.

### **2.1.3.2 Espaciado entre tramas IFS**

El tiempo de intervalo entre tramas se llama IFS. Durante este período mínimo, una estación STA estará escuchando el medio antes de transmitir. Se define cuatro espaciados para dar prioridad al acceso inalámbrico (*ver Figura II.VII*).

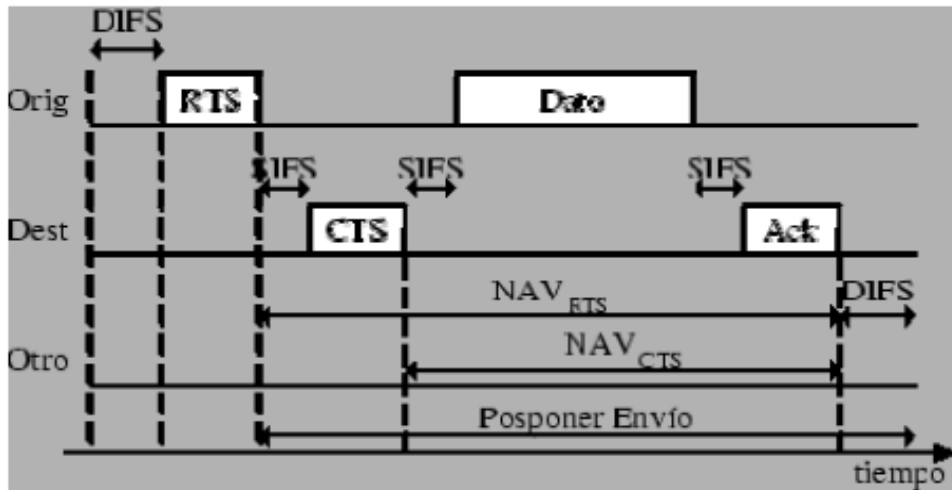


Figura II.VII. Espaciado entre tramas IFS

- ♦ **SIFS (Short IFS)**. Este es el período más corto, usado para acciones de respuesta inmediata. Se usa fundamentalmente para transmitir los acuses de recibo ACK's, también es utilizado para transmitir cada uno de los fragmentos de una trama.
- ♦ **PIFS (Point Coordination Function IFS)**: De duración intermedia, es utilizado por las estaciones para ganar prioridad de acceso en los períodos libres de contienda.
- ♦ **DIFS (Distributed Coordination Function IFS)**: Tiempo de espera normal en las contiendas con mecanismo MACA.
- ♦ **EIFS (Extended IFS)**: Controla la espera en los casos que se detecta una trama errónea.

Las estaciones tienen un conocimiento específico de cuando la estación, tiene el control del medio porque está transmitiendo o recibiendo, para finalizar su período de reserva del canal. Esto se hace a través de una variable llamada NAV (Network Allocation

Vector), que mantendrá una predicción de cuando el medio quede liberado. Todas las estaciones que se encuentren a la escucha actualizarán el valor de su NAV según el valor del campo Duration/ID que intercambian las tramas RTS y CTS.

### 2.1.3.3 Función de Coordinación Puntual (PCF)

Por encima de la funcionalidad DCF se sitúa la función de coordinación Puntual PCF, asociada a las transmisiones libres de contienda que utilizan técnicas de acceso determinísticas. Esta funcionalidad está pensada para servicios de tipo síncrono que no toleran retardos aleatorios en el acceso.

Estos dos métodos de acceso pueden operar conjuntamente dentro de una misma celda o BSS, dentro de una estructura llamada supertrama. Una parte de esta supertrama se asigna al período de contienda permitiendo al subconjunto de estaciones que lo requieran transmitir bajo mecanismos aleatorios. Una vez finaliza este período el punto de acceso toma el medio y se inicia un período libre de contienda en el que pueden transmitir el resto de estaciones de la celda que utilizan técnicas deterministas.

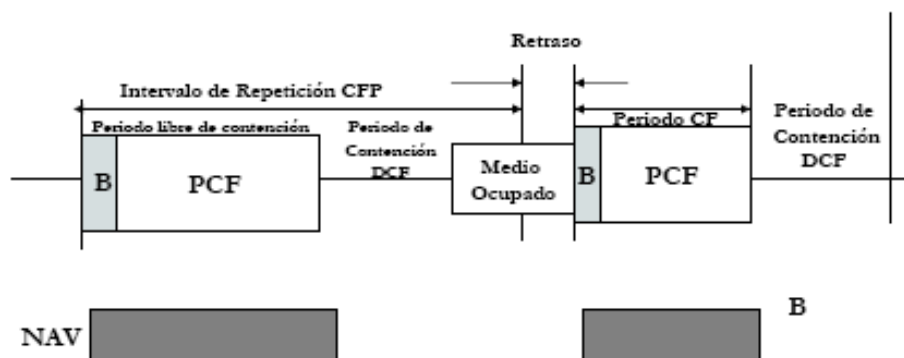


Figura II.VIII. Función de Coordinación Puntual

El funcionamiento de PCF (ver Figura II.VIII) es totalmente compatible con el modo DCF, observándose que el funcionamiento es transparente para las estaciones. Existe un nodo organizador o director, llamado punto de coordinación o PC, este nodo tomará el control mediante el método PIFS, y enviará un CF-Poll a cada estación que pueda transmitir en modo CFP, concediéndole poder transmitir una trama MPDU. El PC mantendrá una lista donde tendrá los datos de las estaciones que se han asociado a modo CF-Poll.

El nodo utilizará una trama para la configuración de la supertrama, llamada Beacon, donde establecerá una tasa de períodos de contienda. Pese a que el período de contienda se puede retrasar por estar el medio ocupado, la tasa se mantendrá en el siguiente período con medio libre.

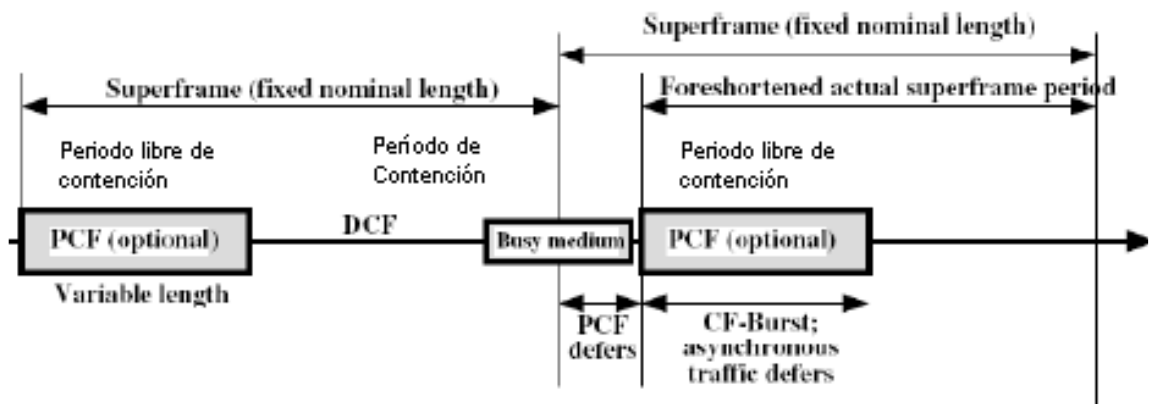


Figura II.IX. Transmisión CF-Polls

Como podemos observar en la Figura II.IX la transmisión CF-Poll espera un tiempo SIFS. También podemos ver que si una estación no aprovecha su CF-Poll se transmite al siguiente en el listado Pollable.

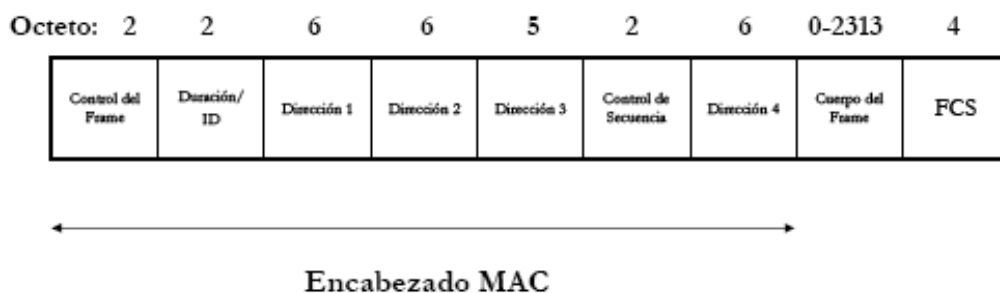
Las estaciones que no utilicen el Período libre de contienda, situarán su NAV al valor del CF y luego lo resetearán para poder modificarlo en el período de contienda en igualdad de condiciones.

#### 2.1.4 Formato de las tramas MAC

Las tramas MAC contienen los siguientes elementos (*ver Figura II.X*):

- ♦ Una cabecera MAC que comprende campos de control, duración, direccionamiento y control de secuencia.
- ♦ Un cuerpo de trama de longitud variable, que contiene información específica del tipo de trama.
- ♦ Una secuencia checksum (FCS) que contiene un código de redundancia CRC de 32 bits.

Las tramas MAC se pueden clasificar en: tramas de datos, tramas de control y tramas de gestión como por ejemplo una trama Beacon.

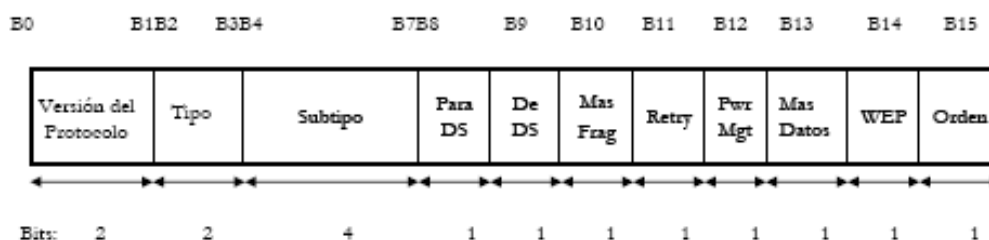


*Figura II.X. Trama MAC genérica*

Los campos que componen esta trama son:

- ♦ **Campo de control**
- ♦ **Duration/ID:** Se utiliza para indicar la duración del período que se ha reservado una estación.
- ♦ **Campos Address 1-4:** Contiene direcciones de 48 bits donde se incluirán las direcciones de la estación que transmite, la que recibe, el punto de acceso origen y el punto de acceso destino.
- ♦ **Campo de control de secuencia:** Contiene tanto el número de secuencia como el número de fragmento en la trama que se está enviando.
- ♦ **Cuerpo de la trama:** Varía según el tipo de trama que se quiere enviar.

Los campos de control de trama tienen el formato de la *Figura II.XI*.



*Figura II.XI. Campos de Control de Trama*

- ♦ **Versión**
- ♦ **Tipo/Subtipo:** La parte tipo identifica si la trama es de datos, control o gestión, mientras que subtipo identifica cada uno de los tipos de tramas.
- ♦ **ToDS/FromDS:** Identifica si la trama envía o recibe al sistema de distribución<sup>8</sup>, en caso de redes ad-hoc<sup>9</sup> tanto ToDS como FromDS están a cero.
- ♦ **Mas fragmentos:** Se activa si se usa fragmentación

<sup>8</sup> DS o backbone red alámbrica o inalámbrica que permite la comunicación entre diferentes BSS

<sup>9</sup> ad-hoc redes inalámbricas que no necesitan una infraestructura previa para su funcionamiento

- ♦ **Retry:** Se activa si la trama es una retransmisión.
- ♦ **Power Management:** se activa si la estación utiliza el modo de economía de potencia
- ♦ **More Data:** Si la estación tiene tramas pendientes en un punto de acceso.
- ♦ **WEP:** se activa si se usa el mecanismo de autenticación y encriptación.
- ♦ **Order:** Se utiliza con el servicio de ordenamiento estricto

## 2.2 DESCRIPCIÓN DEL ESTÁNDAR IEEE 802.15.4 (ZIGBEE)

Más de un centenar de empresas se asociaron bajo el nombre de ZigBee Alliance y trabajaron de forma conjunta en la creación de un estándar orientado a aplicaciones con un ancho de banda y un consumo energético muy reducidos, como las WSN.

Hasta ese momento, los estándares existentes (por ejemplo, Wifi o Bluetooth) estaban orientados a aplicaciones más complejas, con necesidades de un ancho de banda mucho mayor, traducido en un consumo energético elevado.

Finalmente, en 2007 se aprueba el estándar IEEE 802.15.4, conocido comercialmente como ZigBee. Este estándar contempla aspectos tan importantes en las WSN como la autonomía de los dispositivos, una capacidad de transmisión de datos menor (del orden de Kbps) y un coste muy reducido.

La *Tabla II.1* que se muestra a continuación, resume las características principales de esta norma:

<b>PROPIEDAD</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
Rango de TX de datos	868 MHz: 20 Kbps 915 MHz: 40 Kbps 2,4 Ghz: 250 Kbps
Bandas de frecuencia	Dos PHY: 868/915 MHz y 2,4 GHz
Canales	868/915 MHz: 11 canales 2,4 GHz: 16 canales
Direccionamiento	8 bits o 64 bits IEEE
Latencia <sup>1</sup>	Inferior a 15 ms
Alcance	10-20 m
Modulación <sup>2</sup>	868/915 MHz: BPSK 2,4 GHz: O1QPSK

*Tabla II.I. Características principales de ZigBee*

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.

En la *Figura II.XII* se presentan los grupos más dominantes de aplicaciones que están en la mira de ZigBee.



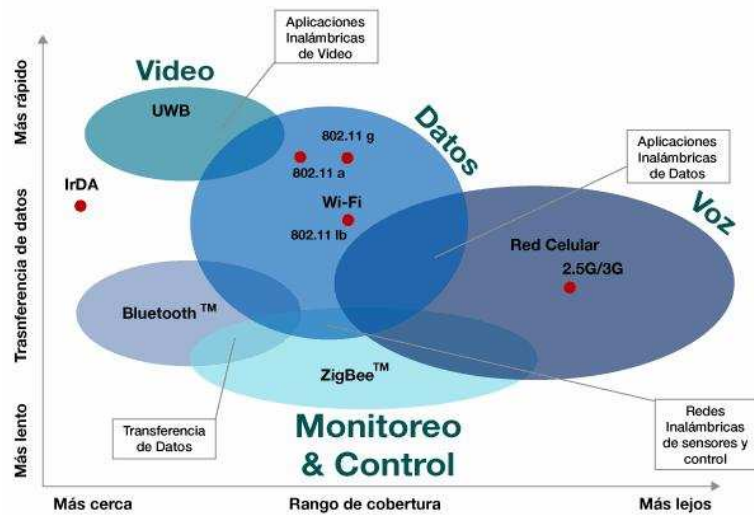


Figura II.XII. Grupos de aplicaciones en la mira de ZigBee.

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). 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, pudiendo por ejemplo, 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.

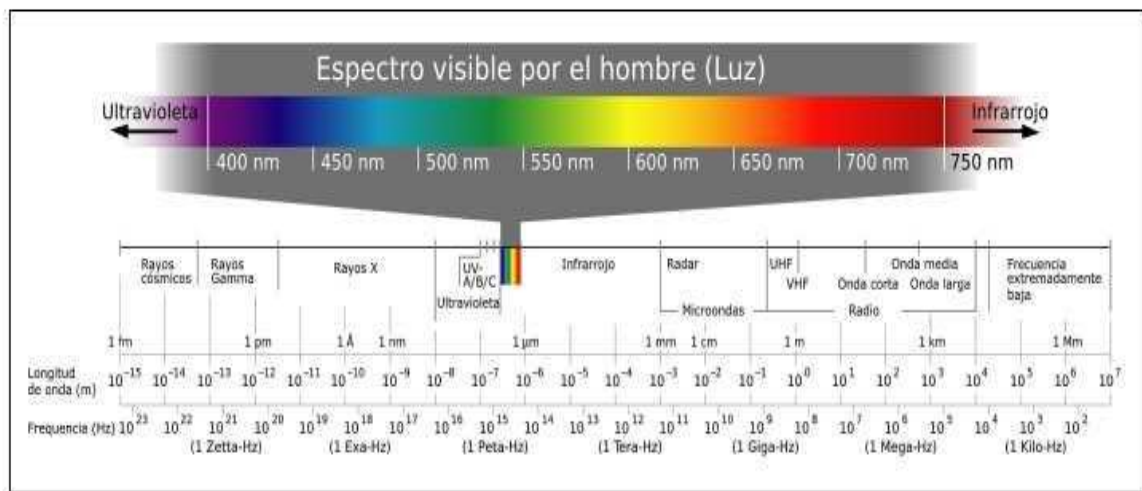
Otra área de aplicación prometedora es el rastreo de bienes, también está en la lista la identificación vehicular, nodos ubicados en vehículos que permiten identificar al vehículo a distancia y descargar información que ha recopilado por un periodo de tiempo determinado, monitorización médica de pacientes 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.

En general, ZigBee resulta ideal para redes estáticas, escalables y con muchos dispositivos, pocos requisitos de ancho de banda y uso infrecuente, y dónde se requiera una duración muy prolongada de la batería.

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 de TCP/IP 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 encontrará sus propios nichos de aplicación.

### 2.2.1 Definición de canal

Dentro del espectro radioeléctrico (ver *Figura II.XIII*), existen unas bandas de frecuencia de acceso libre conocidas como bandas Industrial, Scientific and Medical (ISM).



*Figura II.XIII. Espectro radioeléctrico*

Las bandas ISM se definen en el Artículo 5 de las Radio Regulations (RR), concretamente en los puntos 5.138 y 5.150 y están reguladas por la International Telecommunication Union (ITU).

A mediados de los 80, la Federal Communications Commission (FCC) asignó tres bandas ISM para las redes inalámbricas: la banda de 900 MHz, la banda de 2,4 GHz y la banda de 5 GHz. Podemos observar el rango de frecuencias para cada una de ellas en la *Tabla II.II* que aparece a continuación:

<b>BANDA ISM</b>	<b>RANGO DE FRECUENCIAS</b>
900 MHz	902 - 928 MHz
2,4 GHz	2,4 - 2,4835 GHz
5GHz	5,725 - 5,85 GHz

*Tabla II.II. Banda de frecuencias para las redes inalámbricas*

Concretamente, la banda ISM de 2,4 GHz tiene una anchura de 83 MHz comprendida entre los 2.400 MHz y los 2.483 MHz. Por su carácter de banda sin licencia, la comparten muchos dispositivos inalámbricos, lo que supone una elevada probabilidad de que se produzcan interferencias. Estas interferencias, además de causar errores de transmisión, provocan un aumento del consumo energético y una disminución del rendimiento de la red.

Un aspecto negativo de la banda ISM de 2,4 GHz es que coincide con la frecuencia de resonancia de la molécula de agua. Este hecho provoca una atenuación en la propagación en el aire, en comparación con otros valores de frecuencia más alejados.

ZigBee opera en las bandas libres de 2.4Ghz, 858Mhz para Europa y 915Mhz para Estados Unidos. En la *Figura II.XIV* se puede observar el espectro de ocupación en las bandas del protocolo 802 (incluyendo ZigBee).

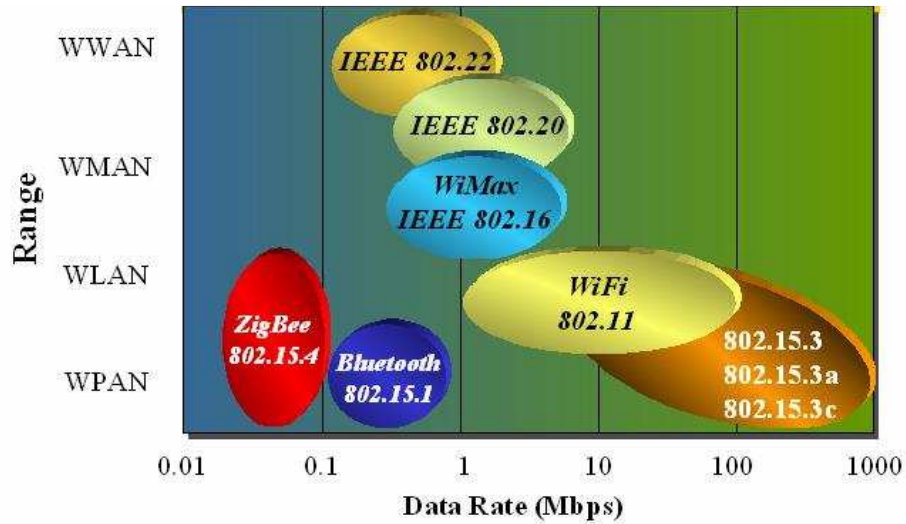


Figura II.XIV. Espectro de ocupación en las bandas del protocolo 802

### 2.2.2 Topologías ZigBee

En ZigBee existen tres tipos de topologías: estrella, árbol, y en red mallada (mesh network), las cuales pueden observarse en la Figura II.XV.

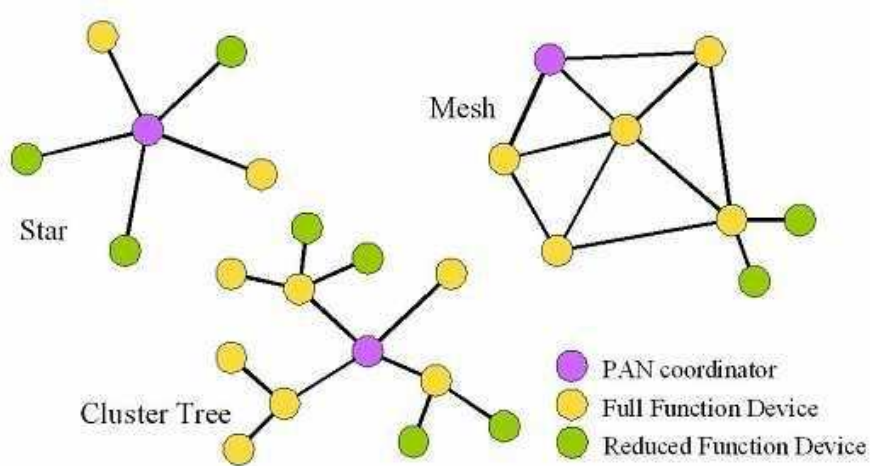


Figura II.XV. Topologías ZigBee

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 stack ZigBee.

Los dispositivos que harán la función de sensores, termostatos 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 de 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, 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.

### **2.2.3 Arquitectura ZigBee**

La estructura de los paquetes ACK, llamada también paquete de reconocimiento, es el lugar en donde se realiza la 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 (*ver Figura II.XVI*), 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.



Figura II.XVI. Campos de los cuatro tipos de paquetes básicos de ZigBee.

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 donde 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 *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.



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, pudiendo 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*”, se usa una estructura de *supertrama* para controlar el acceso al canal, esta *supertrama* es estudiada por el coordinador de red para transmitir “*tramas baliza*” cada ciertos intervalos (múltiples cada de 15.38 ms hasta cada 52 s). 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 para el coordinador, y es entonces cuando mira 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".

Otro aspecto muy importante es la seguridad de las transmisiones y de los datos, los cuales son puntos clave en la tecnología ZigBee que utiliza el modelo de seguridad de la subcapa MAC IEEE 802.15.4 (ver Figura II.XVII), la cual especifica 4 servicios de seguridad:

- ✓ Control de accesos, el dispositivo mantiene una lista de dispositivos "comprobados" en la red.
- ✓ Datos encriptados, las cuales utilizan una encriptación con un código de 128 bits.
- ✓ Integración de tramas, para proteger los datos de ser modificados por otros.
- ✓ Secuencias de refresco, para comprobar que las tramas no han sido reemplazadas por otras. El controlador de red comprueba estas tramas de refresco y su valor, para ver si son las esperadas.

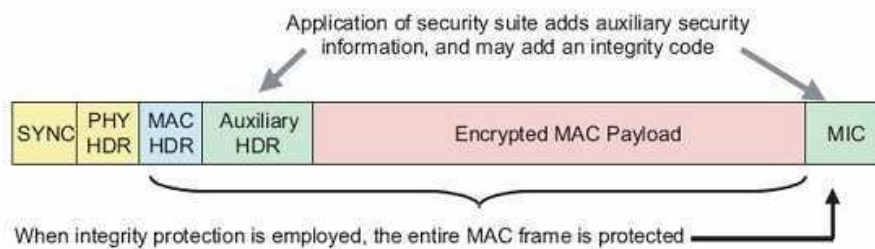


Figura II.XVII. Seguridad en MAC

#### 2.2.4 Dispositivos ZigBee

Se definen tres tipos diferentes de dispositivos ZigBee según su papel en la red (ver *Tabla II.III*).

DISPOSITIVO	CARACTERÍSTICAS
COORDINADOR	<ul style="list-style-type: none"><li>✓ Sólo puede existir uno por red.</li><li>✓ Inicia la formación de la red.</li><li>✓ Es el coordinador de PAN.</li></ul>
ROUTER	<ul style="list-style-type: none"><li>✓ Se asocia con el coordinador de la red o con otro router ZigBee.</li><li>✓ Puede actuar como coordinador.</li><li>✓ Es el encargado del enrutamiento de saltos múltiples de los mensajes.</li></ul>
DISPOSITIVO FINAL	<ul style="list-style-type: none"><li>✓ Elemento básico de la red.</li><li>✓ No realiza tareas de enrutamiento.</li></ul>

*Tabla II.III. Dispositivos ZigBee*

**Coordinador ZigBee (ZigBee coordinator, ZC).**- 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:

**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 computar, 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 coste y una gran simplicidad. Básicamente, son los sensores/actuadores de la red.

## 2.3 ERRORES E INTERFERENCIA

Dentro de las comunicaciones inalámbricas existen dos tecnologías como son las redes inalámbricas de área personal WPAN (por sus siglas en inglés Wireless Personal Área Network) y las redes inalámbricas de área local WLAN (Wireless Local Área Network), diferenciadas principalmente por su alcance o rango de cobertura, es decir la distancia máxima en la que se pueden situar dos estaciones de la comunicación, WPAN cubre distancias inferiores a 10 m mientras que WLAN inferiores a 100 m.

Una característica común de estas dos tecnologías es que operan en la banda a una frecuencia de 2,4 Ghz, por lo que generalmente interfieren una con la otra.

La interferencia es la combinación por superposición de dos o más ondas que concurren en un punto del espacio. La interferencia es un problema provocado por factores atmosféricos, como la nieve, la lluvia o el granizo, se producen también interferencias debido a la reutilización de frecuencias y al filtrado imperfecto. Se tienen, pues, los siguientes tipos de interferencias:

*Interferencia cocanal.*- Producida dentro del ancho de banda del canal.

*Interferencia de canal adyacente.*- Producida a frecuencia contigua del canal interferido.

Además de estos factores se debe tomar en cuenta la interferencia de RF (radio frecuencia), normalmente causada por aparatos que están emitiendo sus señales en un rango cercano, en la misma banda o mismo canal que nuestra transmisión, provocando

aumento, disminución, degradación o neutralización del movimiento ondulatorio de la señal de radio.

Debido a que las redes inalámbricas operan en un espectro de frecuencias utilizado por otras tecnologías, pueden existir interferencias que pueden afectar negativamente al rendimiento, degradando significativamente el nivel de la señal.

Las principales consecuencias que se presentan debido a los niveles de interferencia son la pérdida de paquetes y retrasos en la transmisión debido a colisiones ocurridas en tiempo y frecuencia, los cuales hasta ahora no son críticos, pero con el avance de la tecnología inalámbrica, lanzamiento y popularidad de nuevos dispositivos pueden ser significativos.

Las tecnologías que pueden producir interferencias son las siguientes:

- Teléfonos inalámbricos
- Bluetooth
- Hornos Microondas
- Dispositivos de aplicaciones para el hogar (Control de puertas, sensores, etc)
- Otras redes WLAN

## **CAPÍTULO III**

### **MARCO METODOLÓGICO E HIPOTÉTICO**

#### **3.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN**

Por la naturaleza de la investigación se considera que el tipo de estudio que se va a realizar es una investigación *experimental y correlacional*.

*Experimental*, ya que la investigación va más allá de la descripción de conceptos o fenómenos o del establecimiento de relaciones entre conceptos. Está dirigida a responder las causas de los problemas, es decir el interés del estudio se centra en explicar por qué ocurre el fenómeno de interferencia y en qué condiciones se presenta.

*Correlacional*, debido a que nuestro estudio contempla como se puede manipular la variable independiente que es la interferencia provocada por la tecnología ZigBee en las Redes WLAN 802.11b.

Se utilizará para este proyecto los siguientes métodos de investigación:

**Método Científico y de Observación:** Ya que se tendrá que estudiar y detectar ciertos rasgos de los estándares propuestos para las tecnologías de redes inalámbricas de área local y personal.

**Método Inductivo:** Ya que al observar el estándar de la tecnologías WLAN y el estándar de la tecnología ZigBee en la banda de 2,4 GHz, se va a llegar a una propuesta que permita mitigar los problemas causados por la interferencia.

**Método de Análisis:** Ya que para llegar a una propuesta de solución se tendrá que desglosar todos los problemas que intervienen en la coexistencia entre WLAN y ZigBee, y así asociar una relación causa-efecto para su comprensión.

**Métodos Empírico, Experimental, Comparativo y Estadístico:** Para complementar procesos que se ejecutarán dentro de la investigación.

Se ha realizado las siguientes consideraciones para esta investigación:

- ♦ Se plantea la investigación en base a los problemas existentes de interferencia en la banda de 2.4 GHz.
- ♦ Se trazan los objetivos de la investigación que resolverán el problema de la interferencia en la comunicación de redes inalámbricas concretamente con el estándar 802.11b.



- ♦ Se justifica los motivos por los cuales se propone realizar la presente investigación.
- ♦ Se elabora un marco teórico con una idea general de la realización del trabajo y por consiguiente con un horizonte más amplio.
- ♦ Se plantea una hipótesis, la cual es una posible respuesta al problema planteado y posee una íntima relación entre el problema y el objetivo.
- ♦ Se propone la operacionalización de las variables en base a la hipótesis planteada.
- ♦ Se define las unidades de análisis y se delimita la población que va a ser comparada en relación a la propuesta de la investigación.
- ♦ Se realiza la recolección de datos de los índices e indicadores respectivos mediante la observación directa y los tests.
- ♦ Se realiza la prueba de la hipótesis con los resultados obtenidos.
- ♦ Se elabora las conclusiones y recomendaciones producto de la investigación realizada.

### **3.2 SISTEMA DE HIPÓTESIS**

MEDIANTE LA EVALUACIÓN DE LOS PROBLEMAS DE INTERFERENCIA EN LA TRANSMISIÓN ZIGBEE, SE PRETENDE PROPONER SOLUCIONES A ESTOS PROBLEMAS DE MODO QUE SE PUEDA ASEGURAR LA COEXISTENCIA CON DISPOSITIVOS DE OTRAS TECNOLOGÍAS.

### 3.3 OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES

De acuerdo a la hipótesis planteada se han identificado dos variables:

♦ *Variable Independiente:*

La interferencia provocada por la tecnología ZigBee en las Redes WLAN 802.11b.

♦ *Variable Dependiente:*

Proponer soluciones para asegurar la coexistencia ZigBee – Wifi.

La operacionalización conceptual y metodológica de las variables se muestra en la *Tabla III.I* y *Tabla III.II* respectivamente.

#### 3.3.1 Operacionalización Conceptual

*Tabla III.1. Operacionalización Conceptual de las variables del proyecto*

VARIABLE	TIPO	DEFINICION
Interferencia provocada por la tecnología ZigBee en las Redes WLAN 802.11b.	Independiente	Problema causado debido a la proximidad y operación simultánea de la tecnología ZigBee y redes WLAN 802.11b.
Proponer soluciones para asegurar la coexistencia ZigBee-Wifi.	Dependiente	Asegurar la capacidad de comunicación entre dispositivos, y permite que la información intercambiada llegue a su destinatario de una manera aceptable.

### 3.3.2 Operacionalización Metodológica

Tabla III.II. Operacionalización Metodológica de las variables del proyecto

HIPÓTESIS	VARIABLES	INDICADORES	INDICES	INSTRUMENTOS
La interferencia provocada por Dispositivos Inalámbricos de Telefonía Fija en las Redes WLAN 802.11b incide de manera negativa en los Niveles de Fiabilidad de la comunicación.	V. Independiente  Interferencia provocada por la tecnología ZigBee en las Redes WLAN 802.11b.	♦ Paquetes intercambiados en la transmisión	1. Número de paquetes con y sin interferencia  2. Paquetes por segundo con y sin interferencia  3. Distancia entre dispositivos	♦ Iniciativas ♦ Intuición ♦ Simulaciones ♦ Razonamiento ♦ Sniffer inalámbrico (Capsa, Iperf)
		♦ Rendimiento	4. Velocidad de transmisión  5. Tiempo de transmisión  6. Jitter	♦ Iniciativas ♦ Intuición ♦ Simulaciones ♦ Razonamiento ♦ Sniffer inalámbrico (Capsa, Iperf)
		♦ Espectros Wifi	7. Grado de utilización del canal  8. Amplitudes de espectros Wifi	♦ Simulaciones ♦ Iniciativas ♦ Analizador de espectros (Wi-Spy)

	V. Dependiente	♦ Paquetes intercambiados en la transmisión	9. Número de paquetes en la transmisión 10. Paquetes por segundo en la transmisión	Iniciativas ♦ Intuición ♦ Simulaciones ♦ Razonamiento Sniffer inalámbrico (Capsa, Iperf)
	Proponer soluciones para asegurar la coexistencia ZigBee – Wifi.	♦ Rendimiento	11. Velocidad de transmisión 12. Tiempo de transmisión 13. Jitter	♦ Iniciativas ♦ Intuición ♦ Simulaciones ♦ Razonamiento ♦ Sniffer inalámbrico (Capsa, Iperf)
		♦ Espectros Wifi	14. Espectros de transmisión Wifi 15. Amplitud de los espectros Wifi	♦ Simulaciones ♦ Iniciativas ♦ Analizador de espectros (Wi-Spy)

### 3.3.3 Conceptualización de los índices

- ♦ **Número de paquetes con y sin interferencia**

Un paquete de datos es una unidad fundamental de transporte de información en todas las redes de computadoras modernas. El término datagrama es usado a veces como sinónimo.

Un paquete está generalmente compuesto de tres elementos: una *cabecera* (*header* en inglés) que contiene generalmente la información necesaria para trasladar el paquete desde el emisor hasta el receptor, el *área de datos* (*payload* en inglés) que contiene los datos que se desean trasladar, y la *cola* (*trailer* en inglés), que comúnmente incluye código de detección de errores.

En la presente investigación al habla de paquetes de datos con interferencia y sin interferencia se hace referencia a que los paquetes pueden estar o no afectados por alguna señal en radiofrecuencia no deseada

- ♦ **.Paquetes por segundo con y sin interferencia**

La cantidad de procesamiento necesaria para un paquete con 1500 bytes de carga útil es casi la misma que para un paquete con un byte de carga útil. El número de paquetes por segundo determina el número de veces que hay que evaluar la tabla de estado y, en caso

de no encontrar ahí la concordancia, las reglas de filtrado tendrán que ser evaluadas cada segundo, lo que a su vez determina la demanda efectiva en el sistema.

En la presente investigación al habla de paquetes por segundo con interferencia y sin interferencia se hace referencia a que se ha realizado varios experimentos en los cuales se han incluido interferencias en la comunicación inalámbrica en ciertos casos.

♦ **Distancia entre dispositivos**

La distancia entre dispositivos es la separación que existe al realizar los diferentes experimentos en el ambiente de simulación entre la Red Inalámbrica 802.11 b y la red ZigBee, además existe una relación inversa entre el nivel de interferencia detectado y la distancia entre dispositivos.

♦ **Velocidad de transmisión**

La velocidad de transmisión es la relación entre la información transmitida a través de una red de comunicaciones y el tiempo empleado para ello. Cuando la información se transmite digitalizada, esto implica que está codificada en bits (unidades de base binaria), por lo que la velocidad de transmisión también se denomina a menudo tasa binaria o tasa de bits (bit rate, en inglés).

La unidad para medir la velocidad de transmisión es el bit por segundo (bps) pero es más habitual el empleo de múltiplos como kilobit por segundo (kbps, equivalente a mil bps) o megabit por segundo (Mbps, equivalente a un millón de bps).

Es importante resaltar que la unidad de almacenamiento de información es el byte, que equivale a 8 bits, por lo que a una velocidad de transmisión de 8 bps se tarda un segundo en transmitir 1 byte.

La velocidad de transmisión a través de un canal de comunicaciones hace referencia al número de bits transmitidos por unidad de tiempo, pero esto incluye también la información contenida en las cabeceras de los protocolos empleados para transmitir la información entre equipos.

Así pues, si la velocidad nominal de una conexión es de 100 bps y empleamos un protocolo que utiliza tramas de 50 bits de los cuales 10 corresponden a la cabecera, la cantidad de información efectiva que podremos enviar por segundo será de 80bps. Esta es la razón por la que nunca podremos enviar datos a las velocidades nominales de las conexiones que utilizamos (como los 100Mbps de una red Ethernet convencional o los 11 Mbps de una red Wifi 802.11b)

- ♦ **Tiempo de transmisión**

El tiempo que tarda un host o un servidor en enviar los paquetes de datos entre el emisor y el receptor. El tiempo de transmisión se mide desde el instante en que se pone el

primer bit en la línea desde el emisor, hasta que se descarga el último bit del paquete en el receptor. La unidad de medida es el sería en segundo (s).

♦ **Jitter**

Se denomina Jitter (término inglés para fluctuación) a la variabilidad temporal durante el envío de señales digitales, una ligera desviación de la exactitud de la señal de reloj. El jitter suele considerarse como una señal de ruido no deseada. En general se denomina jitter a un cambio indeseado y abrupto de la propiedad de una señal. Esto puede afectar tanto a la amplitud como a la frecuencia y la situación de fase. El jitter es la primera consecuencia de un retraso de la señal. La representación espectral de las variaciones temporales se denomina ruido de fase.

En las telecomunicaciones también se denomina jitter a la variabilidad del tiempo de ejecución de los paquetes. Este efecto es especialmente molesto en aplicaciones multimedia en Internet como radio por Internet o telefonía IP, ya que provoca que algunos paquetes lleguen demasiado pronto o tarde para poder entregarlos a tiempo. El efecto puede reducirse con un búfer de jitter, un búfer de datos, pero a costa de un tiempo de ejecución mayor, algo molesto especialmente en aplicaciones de tiempo real como una conversación.

Este efecto también es de importancia en los semiconductores de procesos. Informaciones críticas del proceso tienen que enviarse y recibirse en un tiempo



determinado. Si el jitter es demasiado grande, ya no puede asegurarse que las informaciones críticas de proceso lleguen a tiempo.

♦ **Grado de utilización del canal**

Chanalyzer (Ver Anexo 4) proporciona un análisis de todos los canales Wi-Fi. Para esto se debe seleccionar la opción "Wi-Fi Informe" desde el menú Informes para obtener información detallada sobre cada uno de los canales, incluido un compuesto "grado". El grado es una medida de la tranquilidad del canal, esta medida es más alta mientras, más silencioso se encuentre el canal.

♦ **Amplitudes de espectros Wifi**

También en Chanalyzer entre los parámetros entregados en el informe de la herramienta se observa un compuesto denominada "amplitud" y se refiere al nivel que alcanza el espectro (ondas electromagnéticas detectadas) en cada uno de los canales de la comunicación Wifi medido en dBm.

### **3.4 POBLACION Y MUESTRA**

La población es el conjunto de todos los elementos a ser evaluados y en la presente investigación la conforman los clientes de redes inalámbricas en la banda de 2.4 GHz concretamente aquellos que utilizan Wi-Fi 802.11b y los dispositivos de tecnología ZigBee.

De esta población se seleccionó una muestra no probabilística, esta es una red inalámbrica en la banda de 2.4 GHz, creada en un ambiente de simulación.

### **3.5 PROCEDIMIENTOS GENERALES**

Se ha procedido a detallar los métodos utilizados en la presente investigación:

**METODO:** Comparativo – experimental

**TECNICAS:** Experimentos y pruebas

**INSTRUMENTOS:** Sniffers (Capsa, Iperf) y Analizador de Espectros (Wi-Spy)

### **3.6 INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS**

De acuerdo a la naturaleza de la investigación, los instrumentos más apropiados para la recolección de datos fueron la comparación de experimentos y pruebas, los mismos que se aplicaron utilizando una red inalámbrica implementada en un ambiente de simulación.

Para la recolección de información se utilizó para ciertos casos la observación directa para comparar niveles de interferencia de la tecnología ZigBee en relación a la distancia entre dispositivos así como el efecto de esta interferencia en la comunicación Wi-Fi, esto ayudándonos con la configuración analizador de paquetes también llamado sniffer, los elegidos fueron: *Capsa Enterprise V.7 e IPERF/JPERF bajo plataforma Windows.*

De la misma manera se comparó niveles de referencia de los experimentos en relación a la solución propuesta por el investigador y así poder determinar los grados de fiabilidad en la comunicación en la red inalámbrica, esto gracias a la utilización de un *Analizador de Espectros* el cual trabaja a nivel de la capa uno del modelo OSI, por lo tanto se puede observar el espectro de frecuencias de la comunicación.

### **3.7 VALIDACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS**

La validez de los instrumentos depende del grado en que se mide el dominio específico de las variables que intervienen en la investigación. Todo instrumento aplicado debe tener como característica fundamental: la validez y la confiabilidad. La validez se refiere al grado en que un instrumento realmente mide la variable que pretende medir.

En lo que tiene que ver a la validez del Analizador de Espectros se acudió a páginas especializadas en el tema en las cuales se comenta de Wi-Spy<sup>10</sup>, un analizador de espectros de bajo costo que puede comprobar en común la interferencia de dispositivos ZigBee, teléfonos inalámbricos, microondas, Wifi y dispositivos Bluetooth. Además se uso un Analizador de Espectros más potente marca Anritsu, modelo MS2724B.

El Wi-Spy de la empresa Metageek consta de un hardware y un componente de software. Un dispositivo USB no más grande que una unidad de memoria Flash con una pequeña antena omnidireccional incluida. Para grabar y mostrar los datos recogidos por el Wi-Spy se tiene un programa llamado Chanalyzer, un análisis de utilidad que se

---

10 <http://www.wi-fiplanet.com/reviews/article.php/3740666>

ejecuta en Windows XP, 2000, Vista y requiere el Microsoft. NET 2,0. A pesar de ser un Analizador de espectros muy barato, sus resultados son confiables comparado con un equipo completo ya que se tienen espectros muy similares como se pueden observar en los experimentos de los anexos 4 y 5.

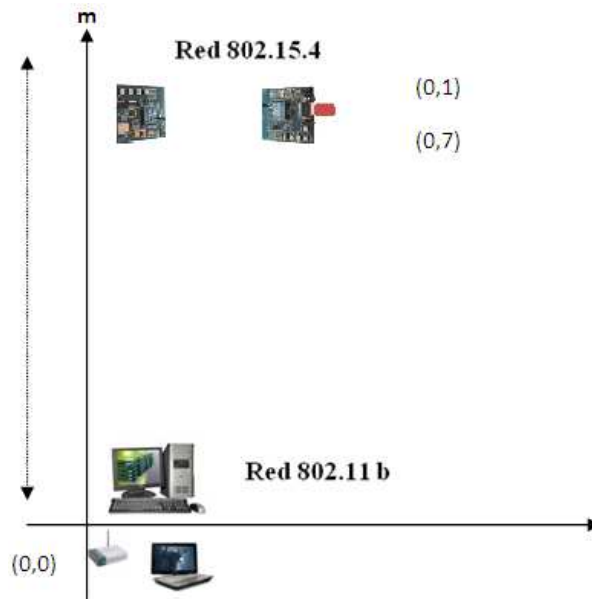
El analizador de espectro MS2724B está diseñado para llevar a cabo análisis de alta precisión en redes WLAN y celulares, incluyendo 802.11a, 3G, ultra-banda ancha, dispositivos inalámbricos y los sistemas médicos de monitorización para pacientes.

Para el análisis en capa 2 o capa de enlace de datos se usará como se mencionó un Analizador de Paquetes o sniffer. Estas herramientas leen el tráfico de las redes Wifi que se encuentran en su alcance y permiten almacenarlo en ficheros para su posterior procesamiento. Se eligió la herramienta Capsa Enterprise v.7 y la herramienta IPERF, que son unos detector de redes inalámbricas 802.11 (802.11b, 802.11a y 802.11g). Capsa Enterprise es una aplicación muy potente, que además hace de sniffer y de sistema de detección de intrusos.

La principal razón de la elección de Capsa es una de las grandes diferencias de esta aplicación con respecto a otras de este tipo, ya que no envía paquetes a la red para generar tráfico, sino que funciona en modo pasivo.

### 3.8 AMBIENTE DE SIMULACIÓN

La *Figura III.I* muestra el ambiente de simulación experimental. Hay que resaltar que la WLAN es fija (0,0); mientras que la red ZigBee y sus pares están libres para moverse a lo largo del eje vertical ((0,1) y (0,7)), es decir sus coordenadas son (0,d).



*Figura III.I. Ambiente de simulación Experimental.*

Este ambiente fue configurado como una red inalámbrica tipo infraestructura, la implementación consiste en una estación portátil y una estación de escritorio conectadas a una red LAN vía un AP, a la estación de escritorio se la denomina servidor de archivos, adicionalmente la red ZigBee está compuesta por dos módulos XBee y se mueven a lo largo del eje vertical, específicamente a una distancia de 1 metro y 7 metros (*Ver Figura III.II*).

Variando la distancia  $d$ , se puede notar variación en el nivel de interferencia de la red ZigBee y de la red WLAN. Por ejemplo, cuando se aumenta  $d$ , el nivel de interferencia

disminuye. Ahora, discutimos los detalles de dos experimentos que implican la transmisión de paquetes de datos de 64 bytes en una red ZigBee y el uso de ftp para la red WLAN. Para cada experimento con valores de distancia de 1 y 7 metros.

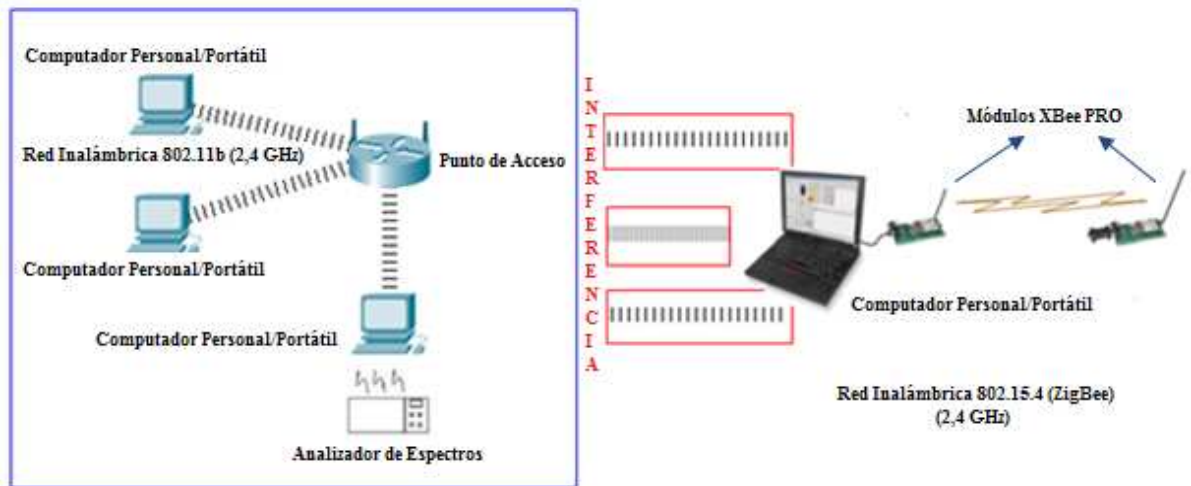


Figura III.II. Ambiente de Simulación

Tabla III.III Detalles Técnicos de los equipos del Ambiente de Simulación

Cantidad	Equipo	Descripción
1	Punto de Acceso	Punto de Acceso Inalámbrico Marca Dlink modelo 2100
1	Estación portátil	Hp Pavilion Tx 2600 con conectividad Wifi
1	Servidor de Archivos	PC de escritorio Clon
1	Kit ZigBee 802.15.4	Módulos XBee PRO, marca Digi

### **Experimento 1 (Anexo 2):**

En el experimento 1 se analiza el tráfico sin la presencia de ninguna señal no deseada en el espectro de la banda de 2.4 GHz, es decir sin la presencia de interferencia alguna; para tal efecto existe una red inalámbrica en modo infraestructura bajo el estándar 802.11b, conformada por:

- ◆ Un Access Point marca DLINK modelo 2100 que opera como nodo central de gestión, dicho punto de acceso viene provisto de una antena externa desmontable con conector RSMA y con sistema de giratorio con dipolo con ganancia de 2 dBi.
- ◆ Existe también un computador de escritorio con componentes fundamentalmente de marca Intel provisto de una antena USB inalámbrica marca TPLINK modelo TL-WN321G que opera como servidor de archivos.
- ◆ Finalmente para el ambiente de simulación se tiene un computador portátil marca HP modelo TX2600 que funciona como un cliente en la red Wlan.

Desde el servidor se copia un archivo de 100 Mbytes hacia el cliente; mientras la transferencia de archivos ocurre se mantiene activo al snifer denominado Capsa para poder analizar datos como número de paquetes transmitidos, paquetes por segundo, tiempo de transmisión y velocidad de transmisión, al mismo tiempo mientras se da la transferencia del archivo también se usa el snifer denominado Iperf que nos permite apreciar datos como la variación en el retardo (Jitter) y el ancho de banda.

## **Experimento 2 (Anexo 2):**

Usando la infraestructura del experimento 1 se procede a realizar el Experimento 2, en este caso introducimos en el ambiente de simulación a los dispositivos que van a generar señales no deseadas a la red inalámbrica 802.11b. Es incorporado al experimento un Kit de Desarrollo ZigBee que consta de:

- ♦ 2 Módulos XBee de alcance de hasta 100 mts
- ♦ 1 Tarjeta de interfase USB
- ♦ 1 Tarjeta de interfase serial
- ♦ 1 Cable USB
- ♦ 1 Cable serial rs-232
- ♦ 1 Convertidor db9 Null Modem
- ♦ Software X-CTU y manuales
- ♦ Broche para pila de 9 volts
- ♦ Eliminador de baterías con adaptadores universales ( USA, Europa, etc)

Con los nuevos dispositivos se implementa una red inalámbrica ZigBee en la banda IMS de 2.4 GHz de tal manera opere de manera simultánea con la Red 802.11b.

Esta vez se observa un ambiente diferente, ya que al mismo tiempo operan 2 tecnologías.



De igual manera desde el servidor se copia un archivo de 100 Mbytes hacia el cliente; mientras la transferencia de archivos ocurre se mantiene activo al sniffer denominado Capsa para poder analizar datos como número de paquetes transmitidos, paquetes por segundo, tiempo de transmisión y velocidad de transmisión, de igual manera mientras se da la transferencia del archivo se usa el sniffer denominado Iperf que nos permite apreciar datos como la variación en el retardo (Jitter) y el ancho de banda. Este proceso en el Experimento 2 se repite a una distancia de 1 metro y de 7 metros entre la red WLAN y la red ZigBee.

### **Experimento 3 (Anexo 4):**

En el experimento 3 se analiza el comportamiento del espectro de la red inalámbrica 802.11b sin la presencia de señales no deseadas, para tal efecto el ambiente de simulación es exactamente igual al del Experimento 1. De igual manera desde el servidor se copia un archivo de 100 Mbytes hacia el cliente. La diferencia radica en que ahora analizamos parámetros importantes como el grado de utilización del espectro en cada uno de los canales del estándar 802.11b y la amplitud de las señales en función de la frecuencia en cada uno de los canales del estándar 802.11b; para tal efecto se usa el kit de la empresa Metageek que está conformado en su parte de hardware por una antena denominada Wy-Spy, la cual tiene conexión USB y un software llamado Chanalyzer v2.1.7, que nos permite obtener de una manera sencilla mediante sus reportes a los parámetros descritos anteriormente.

## **CAPÍTULO IV**

### **ANÁLISIS DE RESULTADOS**

#### **4.1 PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN**

La forma principal para estimar la interferencia es detectando la presencia de otros sistemas que estén funcionando en la misma banda. Por ello para la evaluación de la interferencia se usará un ambiente Wifi 802.11 b en modo infraestructura conviviendo con dispositivos de tecnología ZigBee.

Se realizó un análisis tomando en cuenta cada uno de los indicadores de las variables dependiente e independiente y a su vez se consideró cada uno de los índices que conforman cada indicador. Para cuantificar cada uno de los indicadores se utilizó una media ponderada de sus respectivos índices.

Para la cuantificación de cada índice se utilizó un nivel de medición de valores que van bajando desde 100 % conforme los valores sigan bajando desde el valor máximo de acuerdo a aplicabilidad de cada ámbito del índice.

Se asignó pesos a cada uno de los índices que conforman un indicador, resultando de esta manera una calificación total por cada experimento. Se calcula luego el porcentaje promedio de los experimentos, para comparar con el porcentaje individual de la propuesta de la investigación. Posteriormente para cuantificar las variables dependiente e independiente, se procede a calcular la media ponderada de sus respectivos Indicadores, fijando ponderaciones repartidas equitativamente de porcentaje total por cada una de las variables.

Para propósitos de comparación se calculó las medias ponderadas de los indicadores tanto de la variable dependiente como de la variable independiente.

## **4.2 RESUMEN DE LOS EXPERIMENTOS DE EVALUACIÓN DE INTERFERENCIA**

Para el análisis de la interferencia entre WSN (ZigBee) y WLAN se realizaron varios experimentos con diferentes condiciones y parámetros. Estas pruebas que se exponen en los anexos de esta tesis ayudarán a entender la coexistencia entre estas dos tecnologías o bien, entender la magnitud de interferencia que causan al funcionar al mismo tiempo.

Para ZigBee, se consideraron transmisiones de paquetes de datos. Para WLAN, se utilizó FTP (Software Cerberus) y tráfico IP. En el caso de FTP, para subir un archivo grande a un servidor, los parámetros solicitados son tiempo y tamaño del archivo. El tiempo se representa en intervalos, entre dos comandos de FTP; y el tamaño del archivo se representa en bytes. La comunicación ZigBee entre sus respectivos módulos uno haciendo el papel de coordinador y otro de repetidor.

#### **4.2.1 Análisis de los resultados del experimento 1 y 2**

**VARIABLE INDEPENDIENTE:** La interferencia provocada por la tecnología ZigBee en las Redes WLAN 802.11b.

- ♦ **INDICADOR 1:** Paquetes intercambiados en la transmisión.

Primero, se debe observar que la pérdida de paquetes es menor a medida que la distancia entre las tecnologías se incrementa. Esto es lo esperado puesto que la pérdida de paquetes es mayor cuando el nodo de WLAN está más cerca del nodo ZigBee.

#### ***Índice 1. Número de Paquetes con y sin Interferencia***

En cuanto respecta a número de paquetes transmitidos podemos realizar una relación entre el experimento 1 y el experimento 2 para construir la *Tabla IV.I* y el diagrama de la *Figura IV.I* y la *Figura IV.II*. Cabe decir que el porcentaje fue calculado dándole un peso de 100% al número menor de paquetes transmitidos.

Tabla IV.I. Comparación de paquetes transmitidos en el experimento 1 y 2

METROS	PAQ. SIN INTERFERENCIA	% SIN INTERFERENCIA	PAQ. CON INTERFERENCIA	% CON INTERFERENCIA
UNO	114915	100,00%	115731	99,29%
SIETE	114915	100,00%	115143	99,80%

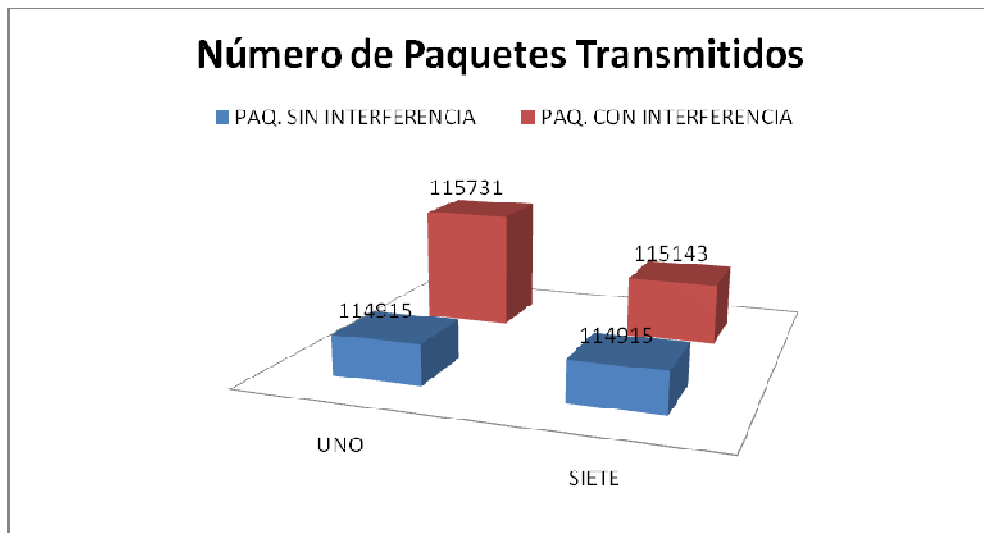


Figura IV.I. Comparación de paquetes transmitidos en el experimento 1 y 2

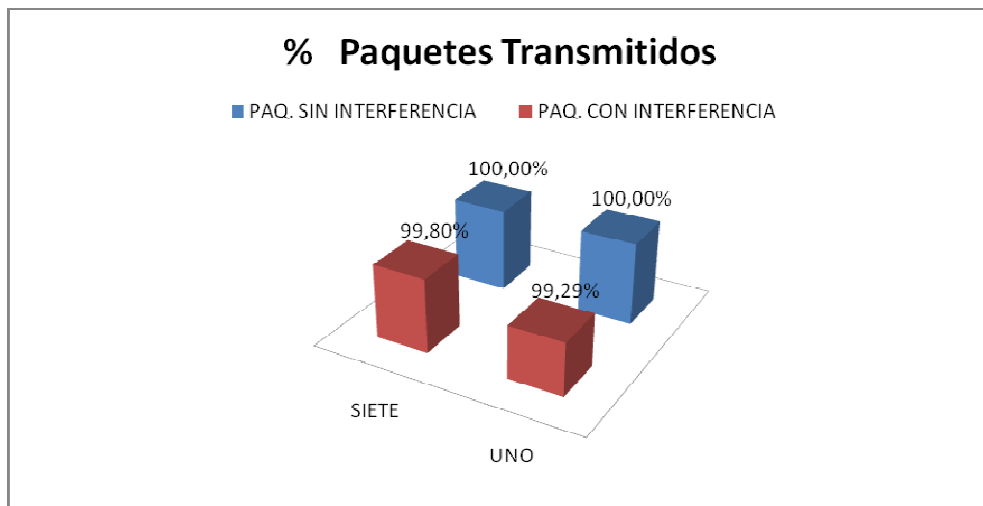


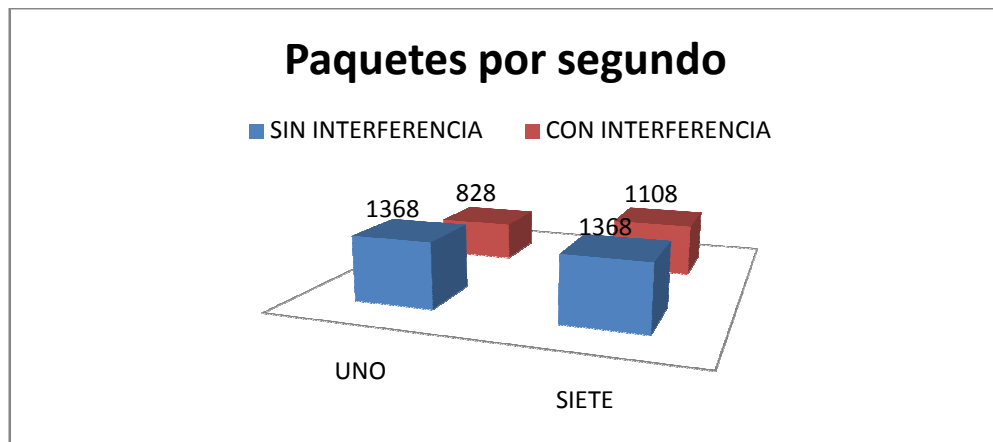
Figura IV.II. Porcentaje de paquetes transmitidos en el experimento 1 y 2

### Índice 2. Paquetes por segundo con y sin Interferencia

Los paquetes por segundo con y sin la interferencia de la tecnología ZigBee se aprecia en la *Tabla IV.II* y el diagrama de la *Figura IV.III*.

*Tabla IV.II. Análisis de resultados Índice 2*

DISTANCIA[m]	TAMAÑO ARCHIVO[MB]	SIN INTERFERENCIA	% SIN INTERFERENCIA	CON INTERFERENCIA	% CON INTERFERENCIA
		PPS		PPS	
UNO	100	1368	100,00%	828	60,53%
SIETE	100	1368	100,00%	1108	80,99%



*Figura IV.III. Comparación paquetes por segundo del experimento 1*

Si comparamos la *Figura IV.III*, podemos obtener la *Figura IV.IV* y darnos cuenta nuevamente que el efecto de la interferencia de la tecnología ZigBee sobre la transmisión Wifi es mucho mayor conforme están más próximas las tecnologías. Para una distancia de un metro entre las dos tecnologías el mismo archivo vía Wifi se

transmite 540 pps por debajo de cuando no existía la interferencia, es decir que en el experimento 2 tuvimos un decremento en la rate comparado con el experimento 1.

Para 7 metros se sigue teniendo un decremento en la rate en el experimento de 260 pps con relación al experimento 1, aunque en un menor nivel que para una distancia de 1 metro.

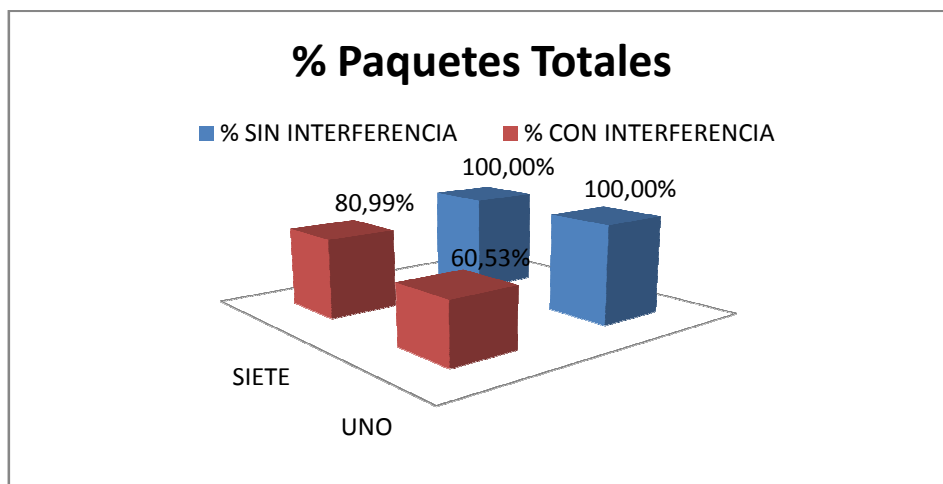


Figura IV.IV. Análisis de resultados Índice 2

### ***Índice 3: Distancia entre dispositivos***

Antes de iniciar con la interpretación vale mencionar que el porcentaje para los índices 1 y 2 fue calculado como un promedio de los porcentajes de las pruebas para 1 y 7 m de las transmisiones. Mientras que el índice 3 fue calculado como un promedio del efecto que tiene la distancia en los índices 1 y 2, todo esto para el caso para la transmisión Wifi sin interferencia y con la interferencia de la tecnología ZigBee.

### **Interpretación:**

La interferencia ocasionada en la comunicación de la tecnología ZigBee a la transmisión Wifi en el experimento 2 provoca que a una distancia de 1 metro se tenga que enviar alrededor de 816 paquetes de datos en la transmisión Wifi, con relación a la transmisión sin interferencia, esto sin duda es debido a las colisiones de paquetes principalmente presentadas en el canal 6 Wifi, induciendo a un mayor número de retransmisiones de los datos.

Para la distancia de 7 metros aun cuando el número de paquetes de datos necesarios para la transmisión Wifi del experimento 2 (218 paquetes) es mayor que el número de paquetes del experimento 1, no es tan notable como lo fue a la distancia de un metro. Es decir la interferencia disminuye conforme la distancia de separación de las tecnologías se incrementa.

Como se puede observar en la *Tabla IV.III* y en la *Figura IV.V* el porcentaje de paquetes (índice 1) transmitidos es mayor cuando existe la interferencia de ZigBee en la transmisión de archivos vía Wifi específicamente en alrededor de un 0.5 % de paquetes.

Para el porcentaje del segundo índice es decir, la cantidad de paquetes por segundo, se puede ver que es mayor la rate cuando no hay interferencia de ZigBee en Wifi. Esto, alrededor de un 36%.



Tabla IV.III. Análisis de resultados Variable Dependiente, Indicador 1

INDICADOR 1		
Índices	% sin interferencia	% con interferencia
1. Número de paquetes	100,00%	99,55%
2. Paquetes por Segundo	100,00%	70,76%
3. Distancia entre dispositivos	100,00%	85,15%

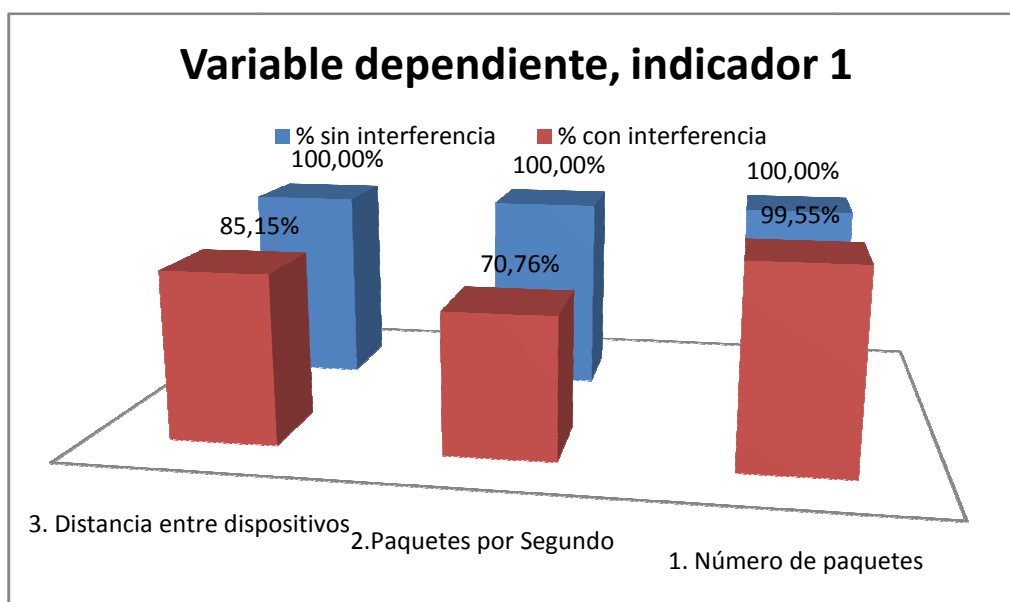


Figura IV.V. Análisis de resultados Variable Dependiente, Indicador 1

Como podemos comprobar el nivel de interferencia entre los sensores ZigBee y Wifi aumenta conforme la distancia entre las tecnologías se reduce, esto expresado en el número mayor de paquetes que se tiene que enviar para pasar un archivo del mismo tamaño, cuando trabajan dispositivos de las dos tecnologías, así como la rate se ve afectada disminuyendo el número de paquetes por segundo transmitidos.

♦ **INDICADOR 2:** Rendimiento

**Índice 4. Velocidad de transmisión**

Para este índice tenemos una relación entre las *Tabla IV.IV* y *Tabla IV.V* y los diagramas de las *Figura IV.VI* y *Figura IV.VII*.

*Tabla IV.IV. Comparación de la velocidad de transmisión en el experimento 1 y 2*

<b>METROS</b>	<b>VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN [MBps] S.I.</b>	<b>VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN [MBps] C.I.</b>
<b>UNO</b>	8,88	7,92
<b>SIETE</b>	8,88	8,42

*Tabla IV.V. Comparación de velocidad de transmisión en el experimento 1 y 2*

<b>METROS</b>	<b>VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN [MBps] S.I.</b>	<b>% VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN [MBps] S.I.</b>	<b>VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN [MBps] C.I.</b>	<b>% VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN [MBps] C.I.</b>
<b>UNO</b>	8,88	100,00%	7,92	89,19%
<b>SIETE</b>	8,88	100,00%	8,420	94,82%

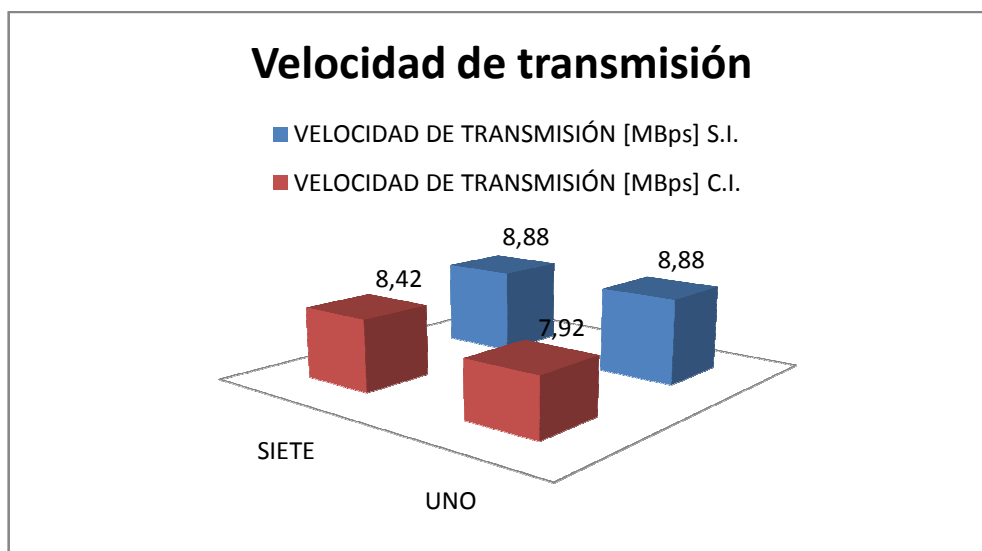


Figura IV.VI. Comparación de la velocidad de transmisión en el experimento 1 y 2

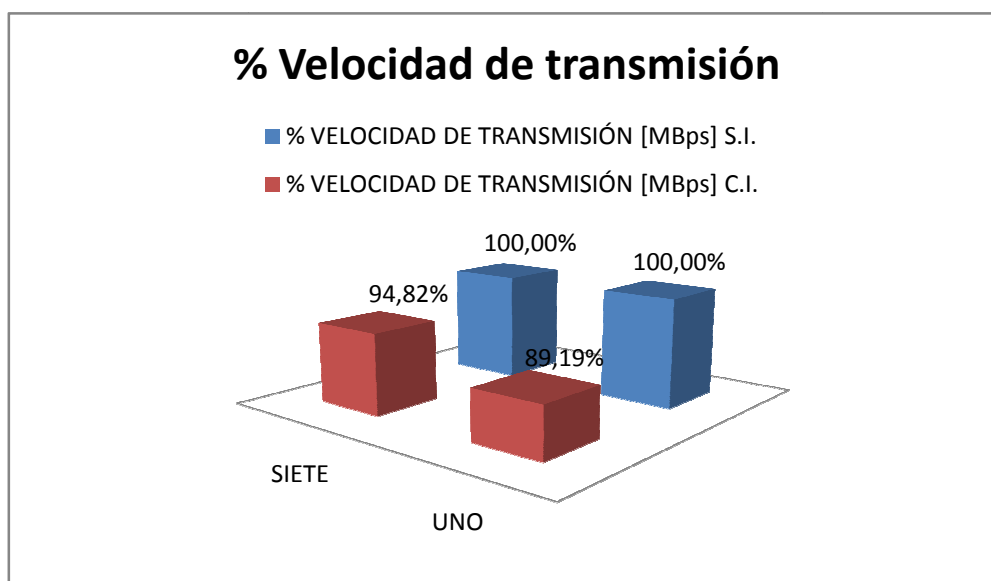


Figura IV.VII. % Comparación de la velocidad de transmisión en el experimento 1 y 2

Las *Tabla IV.IV* y *Tabla IV.V* nos muestran los máximos valores que alcanza la velocidad de transmisión o en otras palabras se puede decir el ancho de banda para cada prueba en el experimento, a una distancia de 1m y 7m se puede observar una velocidad

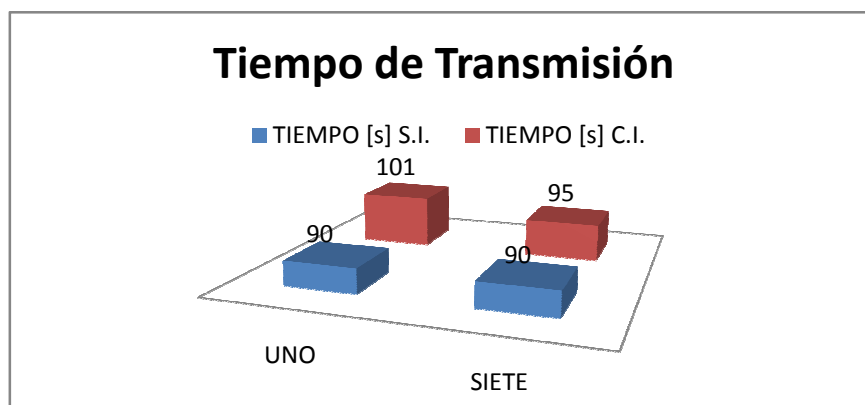
de 8,88 MBps. Cabe recordar que el tamaño del archivo transferido vía Wifi es 100 Mbytes.

### ***Índice 5: Tiempo de Transmisión***

El tiempo que tarda en copiarse el archivo de 100 Mbytes en cada una de las pruebas de los experimentos se muestra en la *Tabla IV.VI* y en la *Figura IV.VIII*, aquí se puede observar que la interferencia de los sensores ZigBee tiene un mayor efecto a distancias mínimas expresado en este caso en un mayor tiempo de transmisión.

*Tabla IV.VI. Comparación del Tiempo de transmisión en el experimento 1 y 2*

METROS	TIEMPO [s]	TIEMPO [s]
	S.I.	C.I.
UNO	90	101
SIETE	90	95

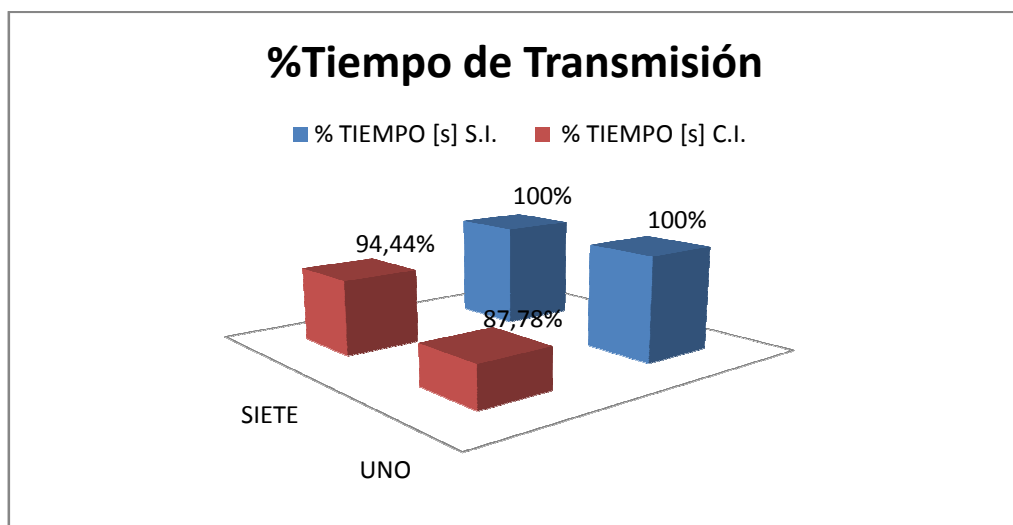


*Figura IV.VIII. Comparación del Tiempo de transmisión en el experimento 1 y 2*

Finalmente se puede apreciar el índice 5 en la *Tabla IV.VII* y en la *Figura IV.IX* en función de porcentajes, dando un valor de 100% al tiempo de transmisión cuando no existe ninguna interferencia, es decir el menor tiempo de transmisión para el archivo de 100 Mbytes.

*Tabla IV.VII. Porcentajes del Tiempo de transmisión en el experimento 1 y 2*

METROS	TIEMPO [s] S.I.	% TIEMPO [s] S.I.	TIEMPO [s] C.I.	% TIEMPO [s] C.I.
UNO	90	100%	101	87,78%
SIETE	90	100%	95	94,44%



*Figura IV.IX. Diagrama de porcentajes del Tiempo de transmisión en el experimento 1 y 2*

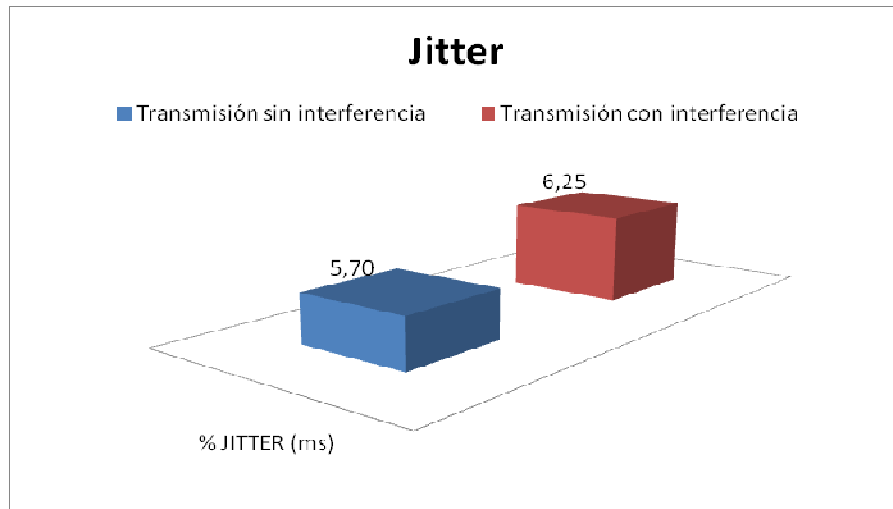
### ***Índice 6. Jitter***

El Jitter de la comunicación en la red Wifi, fue medido con y sin el efecto de la interferencia a una distancia de separación de las tecnologías de 1m.

Se uso el software Iperf, las medidas arrojadas para tal efecto se aprecian en la *Tabla IV.VIII* y en la *Figura IV.X*.

*Tabla IV.VIII. Jitter en el experimento 1 y 2*

EXPERIMENTOS	JITTER (ms)
Transmisión sin interferencia	5,70
Transmisión con interferencia	6,25



*Figura IV.X. Diagrama de Jitter en el experimento 1 y 2*

En la *Tabla IV.IX* y en la *Figura IV.XI* se puede apreciar el índice 6 en función de porcentajes, tomando un valor de 100% al menor jitter registrado que se obtuvo del experimento 1 (Comunicación Wifi sin interferencia).

Tabla IV.IX. Porcentajes Jitter en el experimento 1 y 2

EXPERIMENTOS	JITTER (ms)	% JITTER (ms)
Transmisión sin interferencia	5,70	100%
Transmisión con interferencia	6,25	90,35%

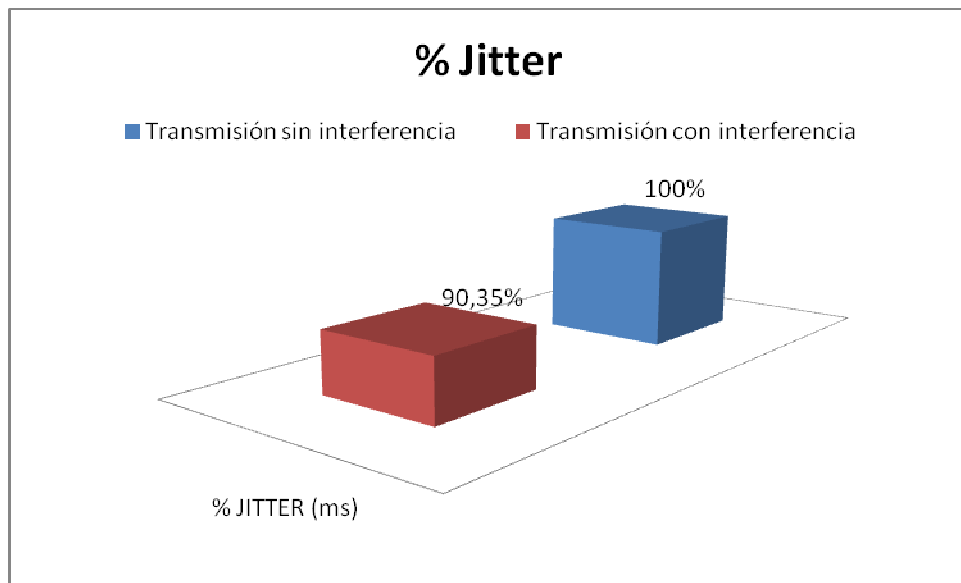


Figura IV.XI. Porcentajes de Jitter en el experimento 1 y 2

**Interpretación:**

En la *Tabla IV.X* y en la *Figura IV.XII*, se puede observar que la interferencia de los sensores ZigBee tiene un mayor efecto a distancias menores, en lo que respecta a la velocidad de transmisión se puede decir que la interferencia está expresada en una disminución de la velocidad (0.860 Mbps para 1 m y 0,46 Mps para 7m); en consecuencia también la interferencia de la tecnología ZigBee tiene un mayor efecto a distancias mínimas pues provoca un mayor tiempo de transmisión (101 s a 1m y 95 s a

7m). Además se puede observar que la interferencia de la red ZigBee sobre la red Wifi provoca un jitter más elevado en comparación a cuando no existen interferencias (6.25 ms vs 5.70 ms), todo esto se refleja en una baja en el rendimiento de la red inalámbrica.

Tabla IV.X. Análisis de resultados Variable Independiente, Indicador 2

INDICADOR 2		
Índices	% sin interferencia	% con interferencia
4. Velocidad de transmisión	100,00%	92,00%
5. Tiempo de transmisión	100,00%	91,11%
6. Jitter	100,00%	90,35%

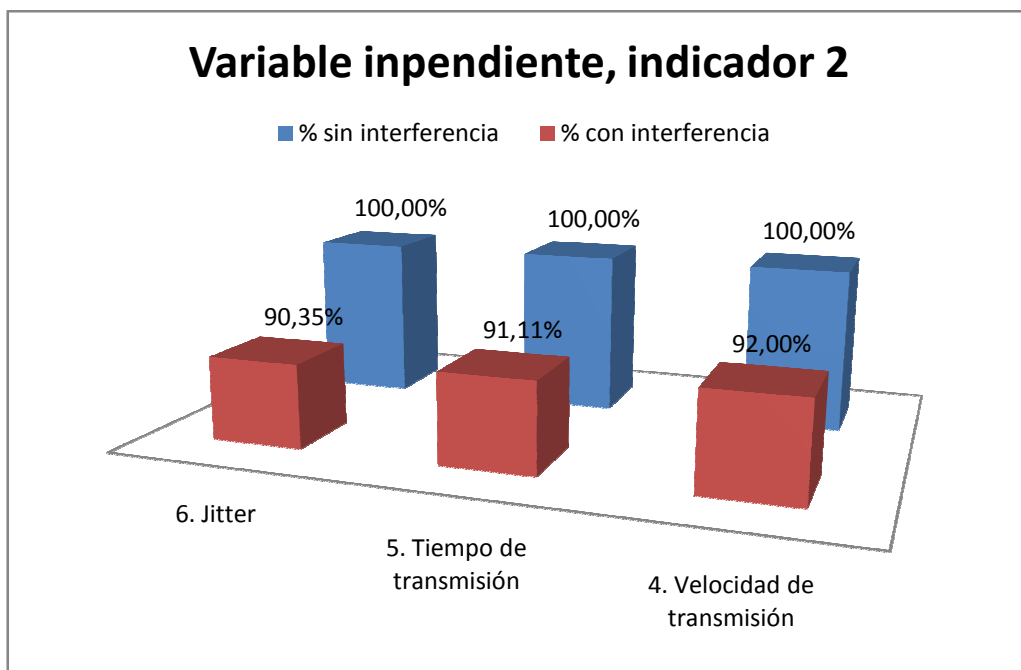


Figura IV.XII. Análisis de resultados Variable Independiente, Indicador 2



#### 4.2.2 Análisis de los resultados del experimento 3

♦ **INDICADOR 3:** Espectros Wifi

Para el análisis de este indicador se utilizó los resultados del experimento 3, específicamente se tomó los reportes de la comunicación Wifi.

Se utilizó la columna “Grado” de los reportes, cuyos valores se transformaron a porcentaje de utilización del canal tomando como 100% el pico máximo de utilización del espectro. Igualmente se halló un porcentaje de la amplitud en cada canal utilizando las columnas “Promedio de Picos” al 100% (véase *Tabla IV.XI, Figura IV.XIII y Figura IV.XIV*)

Channel	Grade (%)	Duty Cycle	Average Floor (dBm)	Average Peak (dBm)	Utilización de canal en Wifi si	% Amplitud de espectros Wifi si
1	79,50204	8,959846	-93,46351	-80,34782	<b>42,93%</b>	<b>45,37%</b>
2	73,41887	11,52084	-92,91256	-76,63043	<b>55,67%</b>	<b>56,32%</b>
3	61,35938	16,45904	-89,67352	-72,86957	<b>80,93%</b>	<b>58,13%</b>
4	57,86559	20,85798	-86,4407	-65,1087	<b>88,25%</b>	<b>73,79%</b>
5	54,82987	24,47054	-83,4311	-58,26087	<b>94,60%</b>	<b>87,06%</b>
6	53,55843	26,15083	-82,17459	-54,47826	<b>97,27%</b>	<b>95,80%</b>
7	55,161	23,95392	-83,74603	-58,26087	<b>93,91%</b>	<b>88,15%</b>
8	58,79852	20,25404	-86,97671	-63,86956	<b>86,29%</b>	<b>79,93%</b>
9	62,41344	16,0009	-90,17993	-68,23913	<b>78,72%</b>	<b>75,89%</b>
10	75,96089	11,37343	-93,20119	-72,21739	<b>50,35%</b>	<b>72,58%</b>
11	80,04222	8,639149	-93,64626	-75,41304	<b>41,80%</b>	<b>63,07%</b>
12	80,54124	6,857528	-93,78378	-76,84782	<b>40,75%</b>	<b>58,58%</b>

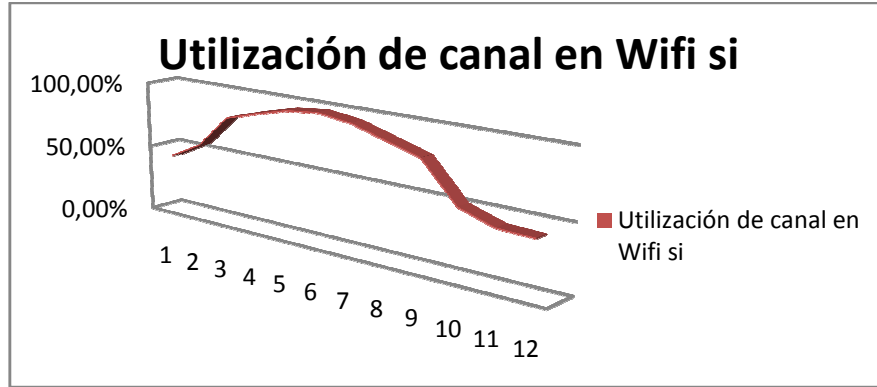


Figura IV.XIII. Diagrama de utilizaciones de canal de Wifi

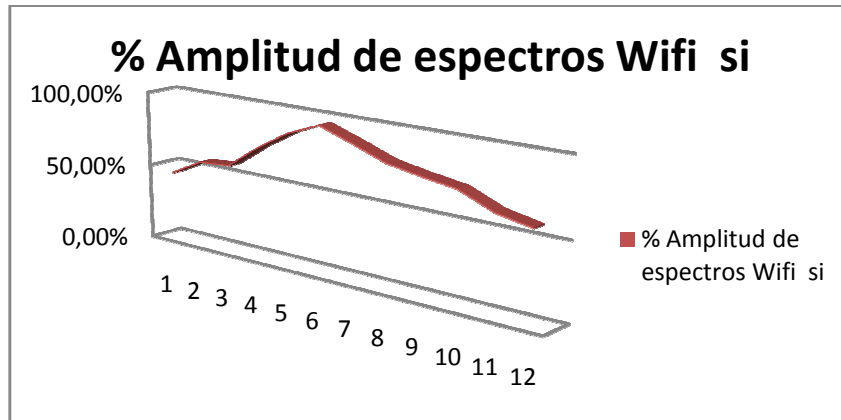


Figura IV.XIV. Diagrama de amplitud de espectro de Wifi

**Interpretación:**

Como podemos observar en la *Tabla IV.XI*, la *Figura IV.XIII* y *Figura IV.XIV* los niveles de las señales de transmisión y utilización de Wifi obtienen un pico promedio máximo en el canal 5, 6 y 7; mientras que significativamente porcentajes bajos para los canales restantes; esto se debe al traslape que existe del canal 6 con los canales adyacentes, es decir que las señales del canal 6 son percibidas en el canal 5 y 7. Al ver que el pico máximo se centra en el canal 6 podemos darnos cuenta que aquí se ubica la

frecuencia central de la comunicación Wifi, mientras que las señales de los canales 1-4 y 8-12 se deben a frecuencias residuales.

La tecnología de ZigBee provoca interferencia a todos los dispositivos que trabajan en la banda de 2.4 GHz. Esta interferencia en la comunicación Wifi en el canal 6, la cual es expresada en el retardo en la transmisión de archivos, deformación de la topología de las señales características, nivel de ocupación de la banda de frecuencia y en el incremento de la amplitud de los espectros cuando las dos tecnologías coexisten. En la *Tabla IV.XII* y *Tabla IV.XV* podemos observar el grado de utilización del canal y la amplitud del espectro de la red Wifi con interferencia provocada por ZigBee.

*Tabla IV.XII. Análisis de resultados de utilización del espectro Variable Dependiente, Indicador 3*

<b>Channel</b>	<b>Grade (%)</b>	<b>Duty Cycle</b>	<b>Average Floor(dBm)</b>	<b>Average Peak (dBm)</b>	<b>Utilización de canal en Wifi ci</b>	<b>Amplitud de espectros Wifi ci</b>
1	73,26219	9,163982	-92,50935	-66,93478	<b>56,00%</b>	<b>88,46%</b>
2	70,55425	10,84461	-91,87546	-64,91304	<b>61,67%</b>	<b>93,26%</b>
3	61,72318	14,08535	-89,20551	-63,86956	<b>80,17%</b>	<b>87,64%</b>
4	59,0065	16,83736	-86,525009	-61,65217	<b>85,86%</b>	<b>86,04%</b>
5	56,27468	19,43505	-83,8203	-56,69565	<b>91,58%</b>	<b>93,82%</b>
6	52,25396	20,59554	-82,8013	-53,8913	<b>100,00%</b>	<b>100,00%</b>
7	56,84721	19,11514	-84,36835	-58,3913	<b>90,38%</b>	<b>89,85%</b>
8	59,99908	16,74638	-87,3785	-63,93478	<b>83,78%</b>	<b>81,09%</b>
9	63,34559	14,06119	-90,37983	-67,95826	<b>76,77%</b>	<b>77,56%</b>
10	75,29906	10,93317	-93,11479	-71,82609	<b>51,73%</b>	<b>73,64%</b>
11	77,0961	9,091519	-93,61235	-74,43478	<b>47,97%</b>	<b>66,34%</b>
12	80,57639	7,842458	-93,8078	-76,26087	<b>40,68%</b>	<b>60,70%</b>

Tabla IV.XIII. Análisis de resultados de utilización del espectro Variable Dependiente, Indicador 3

<b>INDICADOR 3</b>		
<b>Índices</b>	<b>% sin interferencia</b>	<b>% con interferencia</b>
7. Grado de Utilización del Canal	70,96%	72,22%
8. Amplitud de espectros Wifi	71,22%	83,20%

**Interpretación:**

Al comparar los canales restantes es una gran diferencia ya que la propuesta inserta un filtrado para el seleccionar únicamente señales o espectros que usen el canal 6 eliminando señales de canales restantes, nuevamente no elimina en su totalidad pero es una buena aproximación para mejorar la fiabilidad en la coexistencia.

En general, Wifi es susceptible a problemas de coexistencia gracias a dos razones:

- Paquetes grandes en comparación a otras tecnologías: decenas de ms de 802.11b. Esto incrementa la susceptibilidad a colisiones.
- Protocolo de Transmisión: una estación 802.11b espera por silencio antes de transmitir. En algunos casos incluso después de esperar el silencio manda un permiso para enviar y solo después de obtenerlo comienza a transmitir.

### 4.3 RESUMEN DE LAS EQUIVALENCIAS DE LOS PESOS PARA INDICADORES DE LA VARIABLE INDEPENDIENTE

Tabla IV.XIV. Pesos de los indicadores de la variable Independiente

VARIABLE INDEPENDIENTE						
INDICADORES	PAQUETES INTERCAMBIADOS	100%	SIN INTERFERENCIA	CON INTERFERENCIA	100,00%	80,12%
	1. Número de paquetes	15%	100,00%	99,55%	15,00%	14,93%
	2. Paquetes por Segundo	50%	100,00%	70,76%	50,00%	35,38%
	3. Distancia entre dispositivos	35%	100,00%	85,15%	35,00%	29,80%
	RENDIMIENTO	100%			100,00%	91,32%
	4. Velocidad de transmisión	40%	100,00%	92,00%	40,00%	36,80%
	5. Tiempo de transmisión	40%	100,00%	91,11%	40,00%	36,44%
	6. Jitter	20%	100,00%	90,35%	20,00%	18,07%
	ESPECTRO WIFI	100%			71,09%	77,71%
	7. Grado de Utilización del Canal	50%	70,96%	72,22%	35,48%	36,11%
8. Amplitud de espectros Wifi	50%	71,22%	83,20%	35,61%	41,60%	

### 4.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 4.4.1 Variable Independiente

Tomando en cuenta que cada indicador tiene su peso entonces se desglosa cada uno de los promedios de los indicadores (ver Tabla IV.XV y Figura IV.XV).

Tabla IV.XV. Análisis de Resultados para la Variable Independiente: Total Indicadores

VARIABILIDAD DE INDEPENDENCIA						
INDICADOR	VARIABLE INDEPENDIENTE	PONDERACIÓN	SIN INTERFERENCIA	CON INTERFERENCIA	V.IND. (S.I.ZIGBEE)	V.I. (C.I.ZIGBEE)
	PAQUETES INTERCAMBIADOS	40,00%	100,00%	80,12%	40,00%	32,05%
	RENDIMIENTO	40,00%	100,00%	91,32%	40,00%	36,53%
	ESPECTRO WIFI	20,00%	71,09%	77,71%	14,22%	15,54%
<b>TOTAL</b>					94,22%	84,11%
<b>VARIABILIDAD</b>					10,10%	

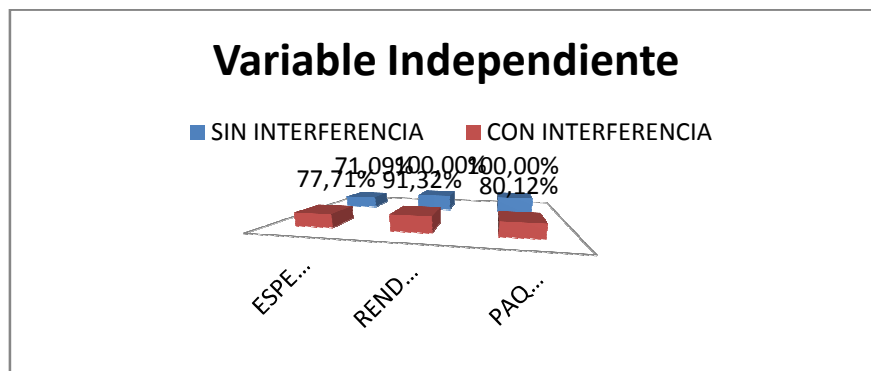


Figura IV.XV. Barras de los resultados de la Variable Independiente

$$V.IND. (S.I.T.) = 0.40 (100.00) + 0.40 (100.00) + 0.20 (71.09) = 94,22 \%$$

$$V.IND (C.I.T.) = 0.40 (80,12) + 0.40 (91,32) + 0.20 (77,71) = 84,11 \%$$

$$Variabilidad = V.I. (S.I.) - V.I. (C.I.) = 94,22\% - 84,11\% = 10,10 \%$$

**Interpretación:**

Se concluye que la Interferencia, específicamente de la tecnología ZigBee, afecta en un 10,10% la transmisión de la información Wifi en la banda de frecuencia de 2,4 GHz.

#### **4.4.2 Variable Dependiente**

Las posibles soluciones y la propuesta del investigador se encuentran descritas en el CAPÍTULO V.

#### **4.5 PRUEBA DE LA HIPÓTESIS**

Las hipótesis científicas son sometidas a prueba para determinar si son apoyadas o refutadas de acuerdo con lo que el investigador observa, en realidad no podemos probar que una hipótesis sea verdadera o falsa, sino argumentar que fue apoyada o no de acuerdo con ciertos datos obtenidos en la investigación.

Por lo tanto no existe un método que permita saber con seguridad que una desviación es el resultado exclusivo del azar, sin embargo hay pruebas estadísticas que permiten determinar algunos límites de confianza. Una de estas es la prueba del Chi-cuadrado ( $X^2$ ) que permite calcular la probabilidad de obtener resultados que únicamente por efecto del azar se desvíen de las expectativas en la magnitud observada si una solución a un problema es correcta.

Para realizar la prueba el primer paso es calcular el valor del Chi-cuadrado el cual responde a la siguiente fórmula:

$$X^2 = \sum \frac{(O - E)^2}{E}$$

Donde:



O = el número observado de una clase particular

E = el número esperado de esta clase, y

Ó = es la sumatoria de todos los valores posibles de  $(O - E)^2 / E$ .

El siguiente paso es determinar los grados de libertad, que son el número de categorías o clases que existe. Generalmente esto es igual a uno menos el número total de clases o indicadores que conforman la matriz, tomando en cuenta para este efecto el número de columnas menos uno por el número de filas menos uno. El paso final en la aplicación de la prueba del Chi-cuadrado es buscar el valor de Chi-cuadrado calculado y los grados de libertad en una Tabla o gráfica que se presenta en el Anexo V y determinar el valor de la probabilidad. Este valor es la probabilidad de que el azar por sí mismo pudiera ser responsable de una desviación tan grande o mayor que la observado, si la hipótesis es correcta. Si la probabilidad es alta se considera que los datos están de acuerdo con la solución, lo cual no prueba que la solución sea correcta, sino que simplemente no se puede demostrar que sea incorrecta. Si la probabilidad es baja, se considera que los datos no respaldan a la propuesta de solución.

Generalmente el nivel de confiabilidad es de 5%, si la probabilidad es menor de 0.05.

Utilizando la prueba del Chi-cuadrado en nuestra investigación se construye la *Tabla IV.XVIII*, para ello tomamos los valores de los indicadores de la variable dependiente tal como se aprecia en la Matriz de Valores Observados (*Tabla IV.XVI*) y en la Matriz de Valores Esperados (*Tabla IV.XVII*).

Tabla IV.XVI. Matriz de Valores Observados

MATRIZ DE VALORES OBSERVADOS		SIN INTERFERENCIA	CON INTERFERENCIA	TOTAL
Existe Interferencia	PAQUETES INTERCAMBIADOS	100,00%	0,00%	100,00%
	RENDIMIENTO	100,00%	0,00%	100,00%
	ESPECTRO WIFI	71,09%	0,00%	71,09%
No Existe Interferencia	PAQUETES INTERCAMBIADOS	0,00%	80,12%	80,12%
	RENDIMIENTO	0,00%	91,32%	91,32%
	ESPECTRO WIFI	0,00%	77,71%	77,71%
	<b>TOTAL</b>	<b>271,09%</b>	<b>249,14%</b>	<b>520,23%</b>

Tabla IV.XVII. Matriz de Valores Esperados

MATRIZ DE VALORES ESPERADOS		CON INTERFERENCIA SIN SOLUCIÓN	CON INTERFERENCIA CON SOLUCIÓN	TOTAL
Existe Interferencia	PAQUETES INTERCAMBIADOS	52,11%	47,89%	100,00%
	RENDIMIENTO	52,11%	47,89%	100,00%
	ESPECTRO WIFI	37,04%	34,05%	71,09%
No Existe Interferencia	PAQUETES INTERCAMBIADOS	41,75%	38,37%	80,12%
	RENDIMIENTO	47,58%	43,73%	91,32%
	ESPECTRO WIFI	40,49%	37,21%	77,71%
	<b>TOTAL</b>	<b>271,09%</b>	<b>249,14%</b>	<b>520,23%</b>

Tabla IV.XVIII. Prueba de la Hipótesis, valores del test de Chi-cuadrado

<b>(O<sub>ij</sub> – E<sub>ij</sub>)</b>	<b>(O<sub>ij</sub> – E<sub>ij</sub>)<sup>2</sup></b>	<b>((O<sub>ij</sub> – E<sub>ij</sub>)<sup>2</sup>/E<sub>ij</sub>)</b>
4,22%	17,8084	0,341746306
4,22%	17,8084	0,341746306
3,00%	10,3684	0,279924406
3,38%	11,4244	0,273638323
3,85%	14,8225	0,311527953
3,28%	10,7584	0,265705112
<b>x<sup>2</sup></b>		<b>1,814288406</b>

Para el valor de Chi-cuadrado tenemos:

$$X^2 = 1,8142$$

Para los grados de libertad tenemos

$$gl = \text{\#clases} - 1$$

$$gl = (\text{\# filas} - 1)(\text{\#columnas} - 1)$$

$$gl = (6-1)(2-1)$$

$$gl = 5$$

Siendo que el valor Chi cuadrado  $X^2$  (1,8142) obtenido es menor que el valor crítico (11.07), se acepta la hipótesis nula que afirma que existe interferencia provocada por Dispositivos de la tecnología ZigBee en las Redes WLAN 802.11b incidiendo de manera negativa en los Niveles de Fiabilidad de la comunicación. En consecuencia como  $X^2=1,8142$  es menor que  $X^2_{1-\alpha} = 11.07$ ; se acepta  $H_0$  y se rechaza la Hipótesis alternativa.

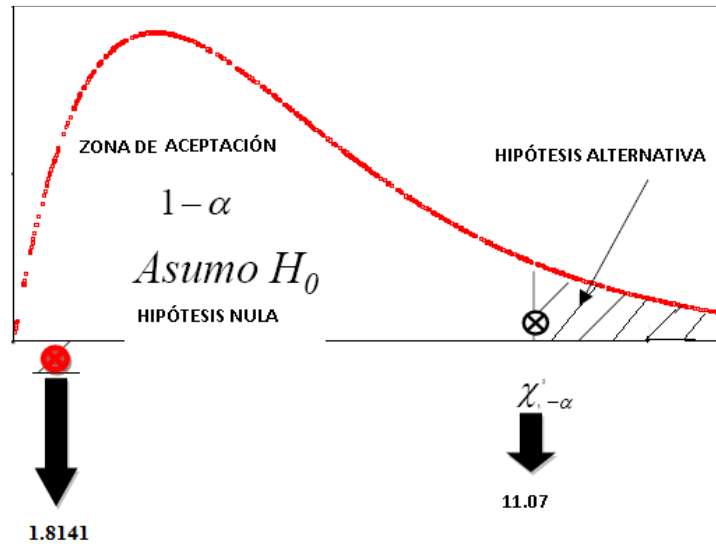


Figura IV.XVI. Diagrama de fijación del nivel de significación

## **CAPÍTULO V**

### **MARCO PROPOSITIVO**

#### **5.1 IMPLEMENTACIÓN DE LA RED ZIGBEE 802.15.4**

##### **5.1.1 Descripción de los módulos RF ZigBee**

Los módulos RF XBee fueron diseñados para operar dentro del protocolo ZigBee y apoyar las necesidades únicas de bajo costo y bajo consumo de energía de redes inalámbricas de sensores.

Los módulos requieren un mínimo de energía y proporcionan una entrega fiable de datos entre los dispositivos remotos. Operan en la frecuencia de 2,4 GHz ISM.

- **Características principales**

*Alto rendimiento y bajo costo*

- Interiores/Urbano: hasta 100' (30 m)
- Exteriores/línea de visión: hasta 300' (100 m)
- Potencia de transmisión: 1 mW (0 dBm)
- Sensibilidad del receptor: -92 dBm

*Bajo consumo*

- Corriente de TX: 45 mA (@3.3 V)
- Corriente de RX: 50 mA (@3.3 V)
- Corriente modo inactivo: < 10  $\mu$ A

*Fácil manejo de los módulos*

- Se usa comandos AT para la configuración de parámetros de los módulos.
- Son de tamaño pequeño.
- Amplio conjunto de comandos para su configuración.
- Software libre X-CTU (software para pruebas y configuración).
- Soporte técnico gratuito.

*Red y seguridad*

- Usa DSSS (espectro ensanchado por secuencia directa)
- Cada canal de secuencia directa tiene más de 65.000 direcciones de red única disponibles.

- Soporta topologías punto-punto, punto-multipunto, igual a igual y malla.

• **Especificaciones**

Tabla V.I. Especificaciones técnicas de los módulos

ESPECIFICACIÓN	XBEE	
<b>RENDIMIENTO</b>	Alcance en ambientes interiores/zonas urbanas	Hasta 100' (30 metros)
	Alcance de RF en Línea de Visión para ambientes exteriores	Hasta 300' (100 metros)
	Potencia de Transmisión	1mW (0 dBm)
	Velocidad de datos RF	250.000 bps
	Sensibilidad del receptor	-92 dBm (1% PER)
<b>REQUERIMIENTO DE POTENCIA</b>	Suministro De voltaje	2.8 – 3.4 V
	Corriente de Operación (transmisión)	45mA (@ 3.3 V)
	Corriente de Operación (recepción)	50mA (@ 3.3 V)
	Corriente modo inactivo	< 10 µA
<b>GENERAL</b>	Banda de frecuencia de funcionamiento	ISM 2.4 GHz
	Dimensiones	0.960" x 1.087" (2.438cm x 2.761cm)
	Temperatura de funcionamiento	-40 a 85°C (industrial)
	Opciones de Antena	Lleva integrado, chip o conector U. FL
<b>RED Y SEGURIDAD</b>	Topologías de red compatibles	Punto a punto, punto a multipunto, de igual a igual ( <i>Peer-to-peer</i> ) y de malla
	Número de Canales (seleccionable por software)	16 Canales de Secuencia Directa
	Opciones de direccionamiento	PAN ID, Canal y direcciones

- **Consideraciones del montaje**

El módulo RF XBee fue diseñado para ser montado en un socket (hembra) y por lo tanto no requiere ninguna soldadura durante el montaje en la placa. Se dispone de placas de interface RS-232 que tienen un socket de 20-pines para recibir los módulos.

### *Descripción de la placa*

La unidad utilizada para la programación y pruebas de funcionamiento es una base con conversores RS232 a serial, que mantiene compatibilidad con los niveles de voltaje de funcionamiento de la línea de equipos XBee de MaxStream perteneciente a la compañía DIGI. Esta unidad trabaja con todos los módulos XBee incluyendo las Series 1 y series 2, en versión estándar y versión Pro. La unidad consta con sockets de fácil inserción para la conexión de los equipos XBee, permitiendo acceso directo a los pines de comunicación serial, programación, y adicionales. La unidad soporta comunicación DTR permitiendo la reprogramación y configuración de los equipos XBee, mediante cualquier emulador de terminal o el software X-CTU proporcionado por MaxStream para la configuración y prueba de radio módems.

### *Especificaciones técnicas de la placa:*

- Voltaje de Funcionamiento: 5 – 12 Vdc
- Voltaje regulado: 3.3 Vdc +/- 10%



- Corriente de funcionamiento: 30 – 150 mA (depende del módulo XBee conectado)
- Interfaz Serial: RS232 estándar, con conector DB9 hembra.
- Velocidad máxima de transmisión: 250 Kbps.
- Equipos compatibles: XBee® & XBee-PRO® DigiMesh™ 2.4 RF Modules, XBee® & XBee-PRO® ZB ZigBee® PRO RF Modules.
- Indicadores luminosos: RX, TX y RSSI (indicador de potencia de señal de recepción).
- Puertos de conexión: 2 sockets adicionales de 2.54 mm de espaciamiento para acceso a todos los pines del radio modem.
- Características adicionales: Botón de reset, alimentación mediante bornera y plug estándar de 5 mm, protección para conexión en contrafase.

*Notas de diseño:*

- Conexiones mínima: VCC, GND, DOUT y DIN.
- Conexiones mínimas para la actualización de firmware: VCC, GND, DIN, DOUT, RTS y DTR.
- La dirección de la señal se especifica con respecto al módulo.
- El módulo incluye una resistencia de pull-up adjunta a RESET.
- Los pines no utilizados deben dejarse desconectados.

La *Figura V.I* muestra las conexiones mínimas que necesita el módulo XBee para poder ser utilizado.

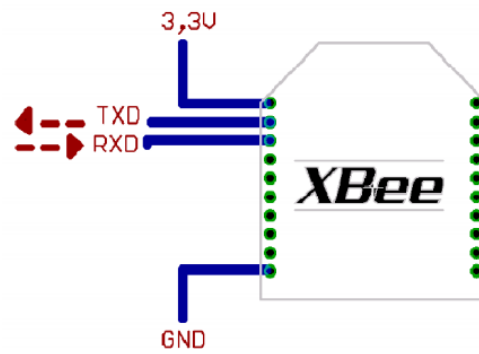


Figura V.I. Conexiones mínimas requeridas para el XBee

El módulo requiere una alimentación desde 2.8 a 3.4 V, la conexión a tierra y las líneas de transmisión de datos por medio del UART (TXD y RXD) para comunicarse con un microcontrolador, o directamente a un puerto serial utilizando algún conversor adecuado para los niveles de voltaje.

### 5.1.2 Modos de operación de los módulos XBee

La Figura V.II muestra los 5 modos de operación de los módulos Xbee:

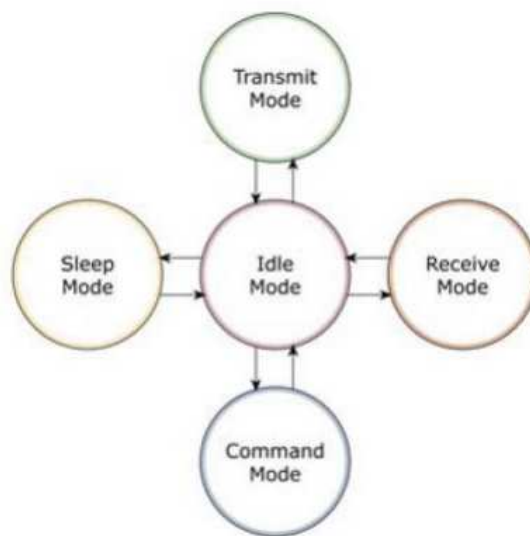


Figura V.II. Modos de operación del modulo Xbee

### **5.1.2.1 Transmit Mode (Modo de Transmisión)**

Cuando los datos seriales se han recibido y están listos para su empaquetamiento, el módulo RF saldrá del modo inactivo y tratará de transmitir los datos. La dirección de destino determina que nodo(s) recibirán los datos.

Antes de la transmisión de los datos, el módulo se asegura que la dirección de red de 16-bits y la ruta del nodo de destino se han establecido.

Si no se conoce la dirección de red de 16-bit, se llevará a cabo el descubrimiento de la dirección de red con el propósito de establecer una ruta para el nodo de destino.

Los datos se transmitirán una vez establecida una ruta. Si el descubrimiento de rutas no logra establecer una ruta, el paquete será descartado.

### **5.1.2.2 Receive Mode (Modo de Recepción)**

Si un paquete RF válido es recibido y su dirección corresponde a la dirección de origen (16-bit) del módulo RF, los datos se transfieren exitosamente.

### **5.1.2.3 Sleep Mode (Modo de Bajo Consumo)**

El modo de sueño hace posible que el módulo RF entre en un modo de bajo consumo de energía cuando no se encuentra en uso.

Por defecto, los modos de sueños están deshabilitado, permaneciendo el módulo en estado de reposo/recepción. En este estado el módulo está siempre preparado para responder a un comando, ya sea, por el puerto serial o por la interfaz RF.

#### **5.1.2.4 Command Mode (Modo de Comando)**

Para modificar o leer los parámetros del módulo RF, el módulo primero debe entrar en modo de comando AT, un estado en el cual los caracteres seriales de entrada son interpretados como comandos.

Este modo permite ajustar parámetros como la dirección propia o la de destino, así como su modo de operación entre otras cosas. Para poder ingresar los comandos AT es necesario utilizar el Hyperterminal de Windows, el programa X-CTU o algún microcontrolador que maneje UART y tenga los comandos guardados en memoria o los adquiera de alguna otra forma.

#### **5.1.2.5 Ide Mode**

Cuando el módulo no se está en ninguno de los otros modos, se encuentra en éste. Es decir, si no está ni transmitiendo ni recibiendo, ni ahorrando energía ni en el modo de comandos, entonces se dice que se encuentra en un estado al que se le llama IDLE.

### **5.1.3 Configuración de los módulos XBee**

#### **5.1.3.1 Software X-CTU**

Si bien es cierto que es posible utilizar Hyperteminal de Windows para configurar un módulo XBEE, existe un programa llamado X-CTU, el cual permite realizar estas operaciones de manera más natural, fácil y rápida.

El X-CTU es una aplicación basada en Windows proporcionada por Digi. Este programa fue diseñado para interactuar con archivos de firmware encontrados en los productos RF de Digi y para proporcionar una fácil interfaz gráfica de usuario.

El ejecutable de este programa se puede encontrar en la página de MCI ingeniería<sup>11</sup> o en la página oficial de XBEE<sup>12</sup>.

La *Figura V.III* muestra la ventana del software X-CTU, con el cual se programan los módulos XBee y XBee PRO, basta con hacer click sobre cualquiera de los parámetros para introducir el valor deseado.

---

<sup>11</sup> [www.olimex.cl](http://www.olimex.cl)

<sup>12</sup> [www.digi.com](http://www.digi.com)

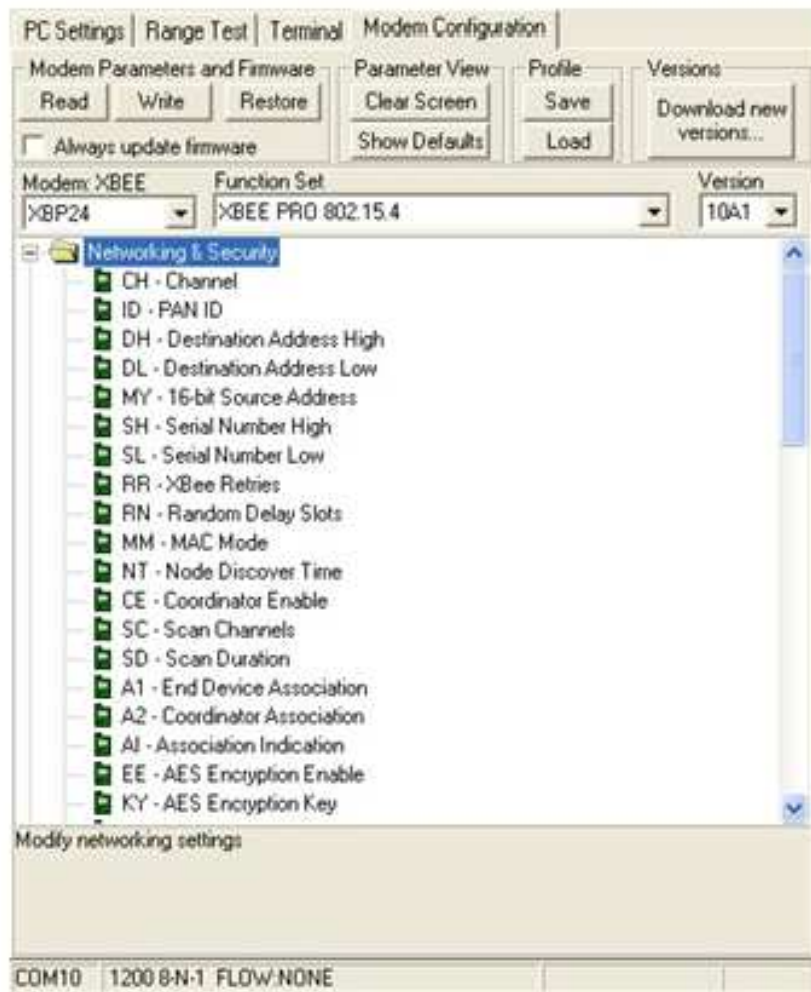


Figura V.III. Ventana del software X-CTU

### 5.1.3.2 Programación de los módulos XBee

Para nuestra red ZigBee programamos un par de módulos XBee PRO para que nada más se puedan ver entre ellos, de esta manera evitamos interferencias de otros módulos que puedan existir en el ambiente aéreo.

Basta con programar 3 parámetros del Modo de Configuración (Mode Configuration) bastante sencillos para poder conectar los módulos (ver Figura V.IV).

Estos parámetros son:

**MY** Source Address (dirección origen)

**DL** Destination Address Low (dirección destino)

**BD** Baud Rate (velocidad de transmisión)

Antes de modificar algún parámetro, se recomienda hacer click en la pestaña **Read** para obtener la información previa que tiene grabada el modulo ZigBee.

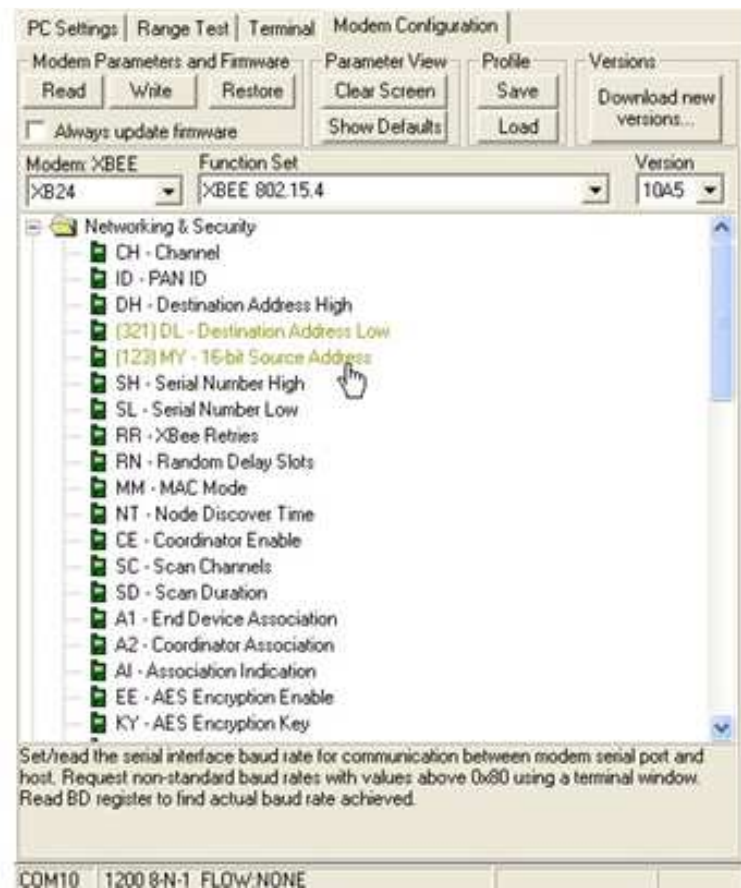


Figura V.IV. Función Mode Configuration

Para programar el Transmisor, en el parámetro MY introducimos el valor 123 y en el parámetro DL introducimos el valor 321.

Para programar el Receptor, en el parámetro MY introducimos el valor 321 y en el parámetro DL introducimos el valor 123.

Esto se traduce de la siguiente manera en términos generales: nuestro Transmisor se llama 123 y le transmite a nuestro Receptor que se llama 321. Los valores pueden ser cualesquiera.

El último parámetro a configurar es el de BD (del menú Serial Interfacing), aquí introduciremos el valor de la velocidad a la cual nuestro microcontrolador enviará y recibirá datos. Por defecto, los módulos vienen programados a 9600 baudios, basta seleccionar el parámetro al valor deseado.

Una vez hecho todo lo anterior, hacemos click en la pestaña Write para que todos los cambios queden grabados permanentemente en el módulo ZigBee.

Con la programación de estos 3 sencillos parámetros, los módulos XBee están listos para trabajar.

## **5.2 ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN**

Como demuestran las mediciones físicas y resultados de la simulación, el problema de coexistencia es significativo. Un sin número de técnicas pueden ser empleadas para reducir la interferencia entre Wi-Fi y ZigBee. Estas técnicas pueden ser agrupadas en cuatro categorías generales:



- ♦ Regulaciones y normas
- ♦ Uso y prácticas
- ♦ Acercamientos técnicos
- ♦ Bandas de frecuencia alternas (5 + Ghz)

### 5.2.1 Regulaciones

Un cambio de regla permitiría a sistemas inalámbricos que usan canales de 1 MHz de ancho para saltar sobre una parte de la banda ISM; por ejemplo, una piconet podría saltar sobre sólo un segmento de la banda. Aunque una gran cantidad de detalles técnicos permanezcan por ser determinados, esta oferta en principio permitiría a Wifi y ZigBee evitarse completamente el uno del otro en algunos escenarios. Sin embargo, esta solución no puede ayudar mucho en ambientes densos como el escenario totalmente cargado de la empresa donde coexisten dos o tres redes Wifi sobre diferentes bandas de frecuencia.

Entre las resoluciones de telecomunicaciones propuestas por el CONATEL, podemos citar las siguientes:

La RESOLUCIÓN-TEL-560-18-CONATEL-2010, considera que la Nota 5.150 del Reglamento de Radiocomunicaciones de la UIT, establece que las bandas 902-928 MHz, 2400-2500 MHz y 5272-5875 MHz están asignadas para aplicaciones industriales, científicas y médicas (ICM).

Que el artículo 42, letra a) del Reglamento General a la Ley de Telecomunicaciones Reformada, establece que, “*El Estado debe fomentar el uso y explotación del espectro*

*radioeléctrico y de los servicios de radiocomunicaciones, de una manera racional y eficiente a fin de obtener el máximo provecho.*

Dicha Resolución resuelve:

**Artículo 6.- Bandas de Frecuencia.-** Se aprobará la operación de sistemas de radiocomunicaciones (incluyendo radiodifusión sonora), que utilicen técnicas de MDBA en las siguientes bandas de frecuencia:

*Tabla V.III. Bandas de MDBA*

<b>BANDA(MHz)</b>	
902	928
2400	2483.5
5150	5250
5250	5350
5470	5725
5725	5850

El CONATEL aprobará y establecerá las características de operación de sistemas de MDBA en bandas distintas a las indicadas en la presente Norma, previo estudio sustentado y emitido por la SENATEL.

**Artículo 24.- Interferencia.-** Si un equipo o sistema ocasiona interferencia perjudicial a un sistema autorizado que está operando a título primario, aún si dicho equipo o sistema cumple con las características técnicas establecidos en los Reglamentos y

Normas pertinentes, deberá suspender inmediatamente la operación del mismo. La operación no podrá reanudarse, hasta que la Superintendencia de Telecomunicaciones envíe un informe técnico favorable indicando que se ha subsanado la interferencia perjudicial.

Tabla V.IV. Potencias permitidas para MDBA

<b>SMDBA</b>		
<b>TIPO DE CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA</b>	<b>BANDA DE OPERACIÓN (MHZ)</b>	<b>POTENCIA PICO MÁXIMA DEL TRANSMISOR (MW)</b>
Punto-punto	2400-2483.5	1000
Punto-multipunto		
Móviles		

Si la ganancia de la antena direccional empleada exclusivamente en los sistemas fijos punto-punto, punto-multipunto y que operan en las bandas de 2400-2483.5 MHz es superior a 6 dBi, deberá reducirse la potencia máxima de salida del transmisor, esto es 1 W, en 1dB por cada 3 dB de ganancia de la antena que exceda los 6 dBi.

### 5.2.2 Uso y Prácticas

Una solución que algunas empresas han tomado hacia la coexistencia ZigBee-Wifi es de prohibir una de las dos tecnologías. Esto no es una solución del todo realizable, porque la gente querrá usar los instrumentos que mejor encajan a sus necesidades.

En el nivel del usuario individual, la operación de varias maneras de ZigBee y Wifi podría ser practicada. Este acercamiento es razonable donde se usa ZigBee sólo esporádicamente y por duraciones cortas (por ejemplo, una sincronización diaria entre un PDA y un Desktop). Sin embargo, como la densidad de Wifi y ZigBee crecen, la interferencia desde y hacia los cubículos se hace una consideración relevante y tiende a minar tales modelos de uso.

### **5.2.3 Acercamientos Técnicos**

**Generales:** A causa del papel de los niveles de energía señal-ruido en la determinación de la pérdida de paquetes, es tentador explorar el papel del poder de transmisión en la mejora de la coexistencia. Simulaciones adicionales demuestran que al bajar los niveles de poder en el nodo ZigBee colocado no cambia la forma básica de la curva de degradación de funcionamiento Wi-Fi, más bien mueve esta curva a la derecha, aumentando el rango sobre la cual cualquier nivel de rendimiento dado es posible. Muchos modelos de uso ZigBee requieren la interacción de corto alcance con otros dispositivos. Considerando estas exigencias de alcance limitado, dispositivos ZigBee con más bajo poder o poder variable podría ser viable y disminuirían el impacto de la interferencia sobre Wi-Fi.

**Capa MAC:** La capa de MAC es un lugar atractivo para enfocar la atención en el mejoramiento de la coexistencia entre ZigBee y Wi-Fi, porque es donde técnicas tales como funciones "escuchar antes de hablar " son puestas en práctica. El modelo de salto de ZigBee hace difícil la operación de Wi-Fi "escuchar antes de hablar" o la historia de

fallos anteriores. Además, no hay ningún mecanismo para ZigBee y Wi-Fi que permita intercambiar información directamente sobre futuras actividades. Ninguno tiene la capacidad de planificar alrededor del otro. Si los cambios de regla como aquellos hablados en la sección sobre regulaciones fueran aprobados, algún método para la identificación mutua mínima e intercambio de información fuera probablemente requerido para su puesta en práctica.

La capa MAC es donde los data rate son determinados, entonces este es el lugar para resolver el data rate contra compensaciones de tamaño de paquete. Como la capa MAC comprende el hardware digital y el software, las técnicas empleadas allí tienden a ser relativamente baratas de poner en práctica. Sin embargo, no todos los problemas pueden ser solucionados en el MAC.

**Capa Física:** Las colisiones en realidad pasan en la capa física. Algunas colisiones en frecuencia de tiempo no pueden ser evitadas a no ser que técnicas de capa física sean usadas. Por ejemplo, la especificación IEEE 802.11b requiere que un ACK sea transmitido dentro de unos microsegundos después de que un paquete es satisfactoriamente recibido. Si la misma estación también transmite un paquete ZigBee al mismo tiempo, entonces el nodo que espera el ACK puede ser atascado por la señal de ZigBee. Sólo con el empleo de técnicas que procesan la señal en la capa física puede evitarse la señal de ZigBee sobre la pasabanda Wifi de modo que el ACK satisfactoriamente pueda ser procesado.

#### **5.2.4 Bandas de Frecuencia Alternas**

Algunos en la industria han colocado los problemas de coexistencia en la banda de frecuencia de 2.4 GHz como la motivación para apresurar la migración a los estándares WLAN en 5 GHz como IEEE 802.11a e Hiperlan2. Los problemas de las WLAN en 5 GHz requieren un artículo separado, pero los puntos relevantes son resumidos aquí:

- Se requieren casi cinco veces el poder de RF (en comparación a 2.4GHZ) para cubrir la misma distancia, todos los otros factores permanecen iguales. Como los amplificadores de poder de RF en 5 GHz son relativamente caros, los sistemas cubrirán una distancia más pequeña, costarán más, o ambos.
- Además la propagación de RF por barreras como paredes es también algo más pobre en 5 GHz.

### **5.3 PROPUESTA DE LA SOLUCIÓN DE INTERFERENCIA ZIGBEE SOBRE WIFI EN LA BANDA DE 2.4 GHZ**

Para solucionar el problema de la coexistencia, varios estudios han sido considerados incluyendo saltos de frecuencia adaptativa (AFH por sus siglas en ingles), control del poder de transmisión (TPC por sus siglas en ingles) y multiplexación por división en el tiempo (TDM). Usando estos mecanismos puede ser posible el uso simultáneo de ambas tecnologías.

En nuestro caso se desea proponer una nueva solución utilizando Acercamientos Técnicos, es decir en el ámbito de hardware o como se mencionó como una técnica de capa física para la solución de las colisiones y utilización de la misma frecuencia en nuestro caso del canal 6, dejando de lado por un momento estos modelos que ya han sido estudiados. Esto debido a que como se observó en los experimentos el data rate no es un problema significativo en la solución de la interferencia por lo tanto no sería una buena propuesta utilizar los acercamientos de la capa MAC.

La interferencia para nuestro estudio se produce en el canal 6, sabiendo que las señales de ZigBee tienen una amplitud con un pico máximo de  $-45$  dbm en transmisión y una amplitud de  $-70$  dbm en no-transmisión, se propone que la solución sería un filtro pasa banda (específicamente un filtro pasa canal desde 2.426 Ghz hasta 2.448 Ghz) para el canal 6 el cual internamente realice funciones de filtro pasa altos, idealmente desde  $-70$  dbm aproximadamente la amplitud mínima de Wifi en no-transmisión sino solo en señales de control.

Para esto se propone la construcción de una antena /filtro la cual tenga características de filtro pasa banda (concretamente sería un pasa canal, para el canal 6 en nuestro caso) y un filtro pasa altos (para nuestro caso idealmente se requería desde los  $-70$  dbm, pero realmente filtra desde los  $-76.5623$  dbm).

Antes de proponer la solución de la tecnología a utilizar en la antena / filtro se estudió la posibilidad de utilizar filtros electrónicos, pero se desestimó esta posibilidad ya que los elementos para construir estos filtros no se encuentran en el mercado nacional y el

diseño se torna complicado para cumplir las características de pasa canal debido al corto ancho de banda necesitado.

Por lo tanto se optó por el estudio de una tecnología nueva en nuestro medio la cual facilita su construcción especialmente a altas frecuencias y con bajos anchos de banda este es el caso de la tecnología microstrip.

El modelo de diseño microstrip que se ha utilizado es el de línea de transmisión, es simple y da una buena interpretación física de lo que ocurre. El modelo de cavidades es más preciso, sin embargo, tiene un muy alto costo computacional. Por último, el modelo de onda completa es mucho más complejo, pero tiene una gran precisión y es muy útil al momento de modelar distintas formas y arreglos de elementos. En lo que sigue se verá en detalle el modelo de líneas de transmisión.

Las líneas de microstrip son comúnmente utilizadas en circuitos integrados de microondas, como tal se puede ver como líneas de transmisión integradas. Son fáciles de fabricar puesto que se utiliza tecnología de circuitos integrados o de circuitos integrados.

Básicamente el modelo de línea de transmisión representa la línea microstrip por ranuras, separadas por una línea de transmisión con impedancia  $Z_c$  y de longitud  $L$ .

Como las dimensiones del parche son finitas a lo largo de su longitud y ancho, los campos en las orillas del parche se van bordeando. La cantidad de bordes es función de



las dimensiones del parche y de la altura del sustrato. Para el plano principal E (plano XY) los bordes son función de la razón de la longitud L del parche y la altura h del sustrato (L/h) y de la constante dieléctrica  $\epsilon_r$  del sustrato. Ya que para las antenas microstrip  $L/h \gg 1$ , el efecto de bordes es reducido, sin embargo, tiene que ser tomado en cuenta porque influye en la frecuencia resonante.

### 5.3.1 Diseño

Los filtros pasa banda son estructuras compactas, se pueden obtener por resonadores acoplados en paralelo. Los resonadores tienen la configuración de longitud de media onda. Sin embargo, a veces los resonadores, es necesario tener en cuenta la reducción de las longitudes de línea de acoplados, lo que reduce el acoplamiento entre los resonadores. Además, si las dos ramas de cada resonador horquilla son muy próximos entre sí, funcionan como un par de líneas acopladas sí mismos, que pueden tener un efecto sobre el acople.

- **Características de la placa**

Las características del sustrato que se consideraron para el diseño de estas estructuras fueron las siguientes:

Substrato:	FR-104
Dieléctrico:	Fibra de Vidrio
Constante dieléctrica:	4.7
Tangente de pérdidas:	0.015

Altura del dieléctrico (h):	0.7778 mm
Conductor:	Cobre
Altura Conductor (t):	0.0175 mm
Frecuencias de resonancia:	2.4 GHz y 5.8 GHz
Longitud eléctrica:	$\lambda/4=90^\circ$

- **Filtro Pasa banda:**

Frecuencia Central:	2.437 GHz
Ancho de Banda:	22 MHz
Impedancia de E/S:	50 $\Omega$
Tipo del Filtro:	Chebyshev
Orden del Filtro:	5
Rizado:	0.25db

### 5.3.2 Cálculos

A partir de las especificaciones obtenemos:

$$\Delta = ((\omega_2 - \omega_1)/\omega_0)$$

$$\Delta = 0.0090$$

La frecuencia central es  $\omega_0$ ,  $\omega_1$  y  $\omega_2$  son las frecuencias de corte, n es el orden del filtro. Mientras mayor sea n será de mejor calidad pero implica la dificultad del diseño e implementación.

Tabla V.V. Valores de los elementos para filtros Chebyshev 0.5 db

<b>n</b>	<b>g<sub>1</sub></b>	<b>g<sub>2</sub></b>	<b>g<sub>3</sub></b>	<b>g<sub>4</sub></b>	<b>g<sub>5</sub></b>	<b>g<sub>6</sub></b>	<b>g<sub>7</sub></b>
<b>1</b>	0,0063249	1	0	0	0	0	0
<b>2</b>	0,11265	0,11194	1,0063	0	0	0	0
<b>3</b>	0,23621	0,45344	0,23621	1	0	0	0
<b>4</b>	0,31789	0,7065	0,71099	0,31588	1,0063	0	0
<b>5</b>	0,36819	0,85864	1,0125	0,85864	0,36819	1	0
<b>6</b>	0,39996	0,9508	1,1849	1,1774	0,95683	0,39744	1,0063
<b>7</b>	0,42086	1,0094	1,2873	1,3534	1,2873	1,0094	0,42089
<b>8</b>	0,43527	1,0485	1,352	1,456	1,4653	1,3434	1,0551
<b>9</b>	0,44551	1,0757	1,3951	1,5201	1,5674	1,5201	1,3951

Los valores prototipo para el filtro son:

$$g_1 = 0,39996$$

$$g_2 = 0,95080$$

$$g_3 = 1,18490$$

$$g_4 = 1,17740$$

$$g_5 = 0,95683$$

$$g_6 = 0,39744$$

$$g_7 = 1,00630$$

A partir de estos coeficientes se calculan las constantes de inversión, para lo que utilizaremos las siguientes expresiones:

$$\bar{c} = \frac{\Delta\pi}{2}$$

$$\bar{J}_{01} = \sqrt{\frac{\bar{c}}{g_1}}$$

$$\bar{J}_{i,j+1} = \frac{\bar{c}}{\sqrt{g_i g_{i+1}}}$$

$$\bar{J}_{N,N+1} = \sqrt{\frac{\bar{c}}{g_N g_{N+1}}}$$

Con las constantes de inversión calculadas en el apartado anterior calculamos las impedancias par e impar de cada línea de transmisión, ya que para realizar el filtro vamos a utilizar líneas acopladas de  $\lambda/4$ .

$$\bar{Z}_0^e = \sqrt{1 + \bar{J}^2} + \bar{J} \quad \text{Impedancia Impar}$$

$$\bar{Z}_0^o = \sqrt{1 + \bar{J}^2} - \bar{J} \quad \text{Impedancia Par}$$

Una vez que calculamos la impedancia par e impar a partir de las constantes de inversión tenemos que desnormalizar en impedancia, y para ello multiplicamos por la impedancia característica  $Z_0 = 50\Omega$ .

Tabla V.VI. Cálculos del Filtros Microstrip

n	gn	J	Ze	Zo	Ze 50	Zo 50
1	0,36819	0,19624903	1,21532395	0,82282588	60,7661973	41,1412942
2	0,85864	0,02522002	1,025538	0,97509795	51,2768999	48,7548976
3	1,0125	0,01520841	1,01532406	0,98490723	50,7662028	49,2453613
4	0,85864	0,01520841	1,01532406	0,98490723	50,7662028	49,2453613
5	0,36819	0,02522002	1,025538	0,97509795	51,2768999	48,7548976
6	1	0,19624903	1,21532395	0,82282588	60,7661973	41,1412942

### 5.3.3 Filtro con Stubs

Se diseño un filtro con líneas acopladas y stubs de 50  $\Omega$ . Graficamos los parámetros S (ver Figura V.V) para optimizar el filtro y tratar de acoplar todas las impedancias y que cumpla con los parámetros establecidos.

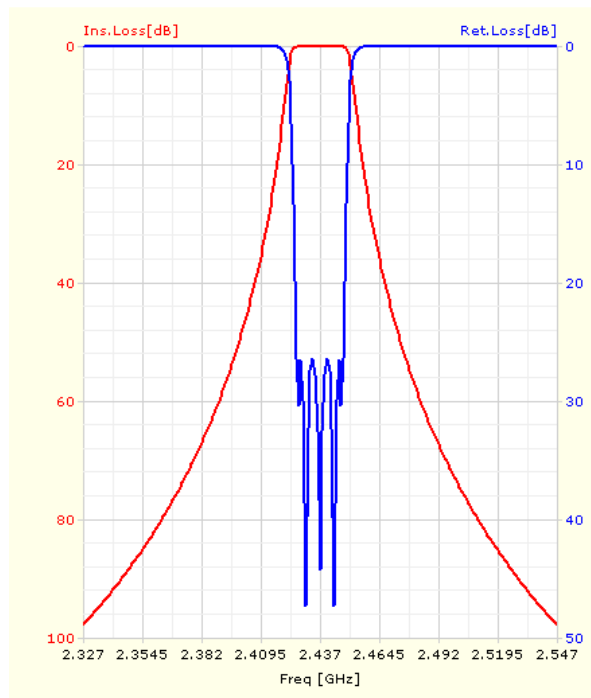


Figura V.V. Parámetros S simulados del Filtro con Stubs

## CONCLUSIONES

1. La coexistencia de tecnologías inalámbricas como la comunicación entre módulos ZigBee en la banda de 2.4 GHz y redes 802.11b en la misma banda de frecuencias implica una interferencia cruzada.
2. Se ha determinado la necesidad de mejorar la comunicación en redes 802.11b cuando se ven afectadas por la interferencia provocada por los dispositivos de sensores inalámbricos ZigBee en la banda de 2.4 GHz.
3. Utilizando un ambiente de simulación, se ha determinado que la interferencia provocada por dispositivos ZigBee en la banda de 2.4 GHz afecta en un 10,10% a la transmisión de la información en la red Wifi.
4. En el estándar 802.11b a nivel de capa MAC los parámetros más afectados por la interferencia son el tiempo de transmisión, la cantidad de datos transmitidos y la velocidad de transmisión, en consecuencia en términos generales los niveles de fiabilidad en la comunicación inalámbrica se ven afectados.
5. A medida que la separación entre la operación de las redes analizadas en la simulación del presente estudio se incrementa, se puede observar que el nivel de afectación a la fiabilidad de la comunicación de la red Wifi se reduce, es decir se ha podido concluir que los niveles de coexistencia entre las dos tecnologías dependen en gran medida de la distancia entre sus dispositivos centrales.

6. Los espectros de las emisiones de los dispositivos ZigBee tienen un nivel de potencia en sus picos menor a los niveles de espectros que alcanza el estándar 802.11b, pero la ocupación del espectro de la banda ISM es mayoritaria provocando de esta manera interferencias con otras tecnologías, por lo que la implementación propuesta de un filtro pasa banda espera minimizar los problemas causados por dispositivos ZigBee.
  
7. El valor de Chi cuadrado obtenido permite aceptar la hipótesis nula que afirma que las transmisiones de dispositivos ZigBee afecta negativamente el rendimiento de las transmisiones de redes Wifi.

## **RECOMENDACIONES**

1. Se debe impulsar estudios complementarios que permitan mejorar los niveles de fiabilidad en las comunicaciones inalámbricas ya que al tener un medio compartido como el espacio libre se tienen varias fuentes de interferencia.
2. Fomentar el estudio de la tecnología microstrip, ya que no está difundida en nuestro medio y puede ser de gran ayuda en múltiples aplicaciones inalámbricas.
3. Se recomienda la utilización del analizador de espectro Wi-Spy, que además de su bajo costo, provee reportes que permiten determinar los problemas que se encuentran en la red a nivel de capa física.



## **RESUMEN**

El estudio comparativo de redes Wifi y WSN (ZigBee) evaluó la interferencia producida entre estas dos tecnologías con el objetivo de proponer una solución que permita su coexistencia.

El método que se utilizó en la investigación fue el Experimental, que permitió responder las causas de los problemas, es decir explicar el por qué ocurre el fenómeno de interferencia y en qué condiciones se presenta, complementando la investigación con la técnica de Chi cuadrado para la comprobación de hipótesis.

El ambiente experimental fue una red Wifi con un Access Point, dos computadoras portátiles y una red de sensores inalámbricos ZigBee. En las mediciones se utilizó herramientas software como el Iperf y hardware como analizadores de espectros.

Una de las estrategias que se utilizó en la medición fue la manipulación de la distancia entre los dispositivos, llegando a comprobarse que a menor distancia existe una mayor interferencia y viceversa.

Los resultados que se obtuvieron al utilizar este ambiente de simulación, permitieron apreciar que la interferencia de la tecnología ZigBee afecta en un 12,7% a la transmisión de la información en las redes Wifi, y por ende provoca una disminución en su rendimiento.

Como conclusión se propuso la implementación de un filtro selectivo microstrip que trabaje en una banda específica para Wifi eliminando las emisiones no deseadas, permitiendo así la operación simultánea de estas dos tecnologías.

## SUMMARY

The comparative study of networks Wifi and WSN (ZigBee) evaluated the interference produced between these two technologies to propose a solution permitting its coexistence.

The method used in the investigation was the experimental one which permitted to give an answer to the causes of the problems, that is explaining why the interference phenomenon occurs and the conditions in which it is presented, complementing the investigation with de Chi square technique for the hypothesis testing.

The experimental environment was a Wifi network with an AccessPoint, two portable computers and a network of wireless ZigBee sensors. In the measurements, software tools such as the Iperf and the hardware such as the spectra analyzers.

One of the strategies used in measuring was the handling of distance between devices, showing that the minor the distance the higher the interference and viceversa.

The results obtained upon using this simulation environment, permitted to consider that the interference of the ZigBee technology affects by 12.7% the information transmission in the Wifi networks and therefore it causes a yield decrease.

As a conclusion, the implementation of a selective microstrip filter in a specific band for the Wifi is proposed eliminating the undesired emissions, thus permitting the simultaneous operation of these two technologies.

## GLOSARIO

<b>Cobertura</b>	Se refiere al área geográfica que cubre una estación específica. Las estaciones transmisoras y las compañías de telecomunicaciones generan mapas de cobertura que le indican a sus usuarios el área en la ofrecen sus servicios. La cobertura suele dividirse en exterior o interior y de voz o de datos (Internet móvil).
<b>Conectividad</b>	Posibilidad de establecer rutas de comunicación entre distintos puntos de una red o entre distintas redes de comunicaciones o entre usuarios de una o de varias redes.
<b>Espectro</b>	Se denomina espectro electromagnético o simplemente espectro a la radiación electromagnética que emite (espectro de emisión) o absorbe (espectro de absorción) una sustancia. Dicha radiación sirve para identificar la sustancia de manera análoga a una huella dactilar. Los espectros se pueden observar mediante espectroscopios que, además de permitir observar el espectro, permiten realizar medidas sobre éste, como la longitud de onda, la frecuencia y la intensidad de la radiación. Espectro electromagnético a la distribución energética del conjunto de las ondas electromagnéticas
<b>Estándar</b>	Un estándar es una especificación que regula la realización de ciertos procesos o la fabricación de componentes para garantizar la interoperabilidad.
<b>Hardware</b>	Corresponde a todas las partes físicas y tangibles de una computadora: sus componentes eléctricos, electrónicos, electromecánicos y mecánicos; sus cables, gabinetes o cajas, periféricos de todo tipo y cualquier otro elemento físico involucrado; contrariamente al soporte lógico e intangible que es llamado software.
<b>Infraestructura</b>	Es aquella realización humana diseñada y dirigida por profesionales de Telecomunicaciones, que sirven de soporte para el desarrollo de otras actividades y su funcionamiento, necesario en la organización estructural de las ciudades y empresas.
<b>Interconexión</b>	Es la conexión física y lógica entre dos o más redes de telecomunicaciones. Su objetivo es facilitar que los usuarios de cualquier operador se puedan comunicar con los usuarios de los demás operadores, y dar acceso a los servicios ofrecidos

por las distintas redes. Concretamente, la Unión Internacional de Telecomunicaciones define a la interconexión como: “los arreglos comerciales y técnicos bajo los cuáles los proveedores de servicios conectan sus equipos, redes y servicios para permitir a los consumidores acceder a servicios y redes de otros proveedores de servicios.

- Interferencia** Es cualquier proceso que altera, modifica o destruye una señal durante su trayecto en el canal existente entre el emisor y el receptor. La palabra destrucción, en este caso, debe entenderse en el sentido de que las ondas cambian de forma al unirse con otras; esto es, después de la interferencia normalmente vuelven a ser las mismas ondas con la misma frecuencia.
- Interoperabilidad** Capacidad de los sistemas de tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC), y de los procesos empresariales a los que apoyan, de intercambiar procesos o datos y posibilitar la puesta en común de información y conocimientos.
- Radiofrecuencia** También denominado espectro de radiofrecuencia o RF, se aplica a la porción menos energética del espectro electromagnético, situada entre unos 3 Hz y unos 300 GHz. El Hertz es la unidad de medida de la frecuencia de las ondas radioeléctricas, y corresponde a un ciclo por segundo. Las ondas electromagnéticas de esta región del espectro se pueden transmitir aplicando la corriente alterna originada en un generador a una antena.
- Red** Es un conjunto de equipos conectados por medio de cables, señales, ondas o cualquier otro método de transporte de datos, que comparten información (archivos), recursos (CD-ROM, impresoras, etc.), servicios (acceso a internet, e-mail, chat, juegos), incrementando la eficiencia y productividad de las personas. Una red de comunicaciones es un conjunto de medios técnicos que permiten la comunicación a distancia entre equipos autónomos. Normalmente se trata de transmitir datos, audio y vídeo por ondas electromagnéticas a través de diversos medios (aire, vacío, cable de cobre, cable de fibra óptica, etc.).
- Remoto** Se considera Administración Remota a la funcionalidad de algunos programas que permiten realizar ciertos tipos de acciones desde un equipo local y que las mismas se ejecuten en otro equipo remoto. Por ejemplo, con una herramienta o aplicación de administración remota, el responsable de una red informática puede acceder a otra computadora para ver si la

misma tiene problemas, sin necesidad de moverse de su escritorio.

**Requerimientos**

Es una necesidad documentada sobre el contenido, forma o funcionalidad de un producto o servicio. Se usa en un sentido formal en la ingeniería de sistemas o la ingeniería de software. En la ingeniería clásica, los requerimientos se utilizan como datos de entrada en la etapa de diseño del producto. Establecen QUÉ debe hacer el sistema, pero NO CÓMO hacerlo.

**Software**

Se conoce como software al equipamiento lógico o soporte lógico de una computadora digital; comprende el conjunto de los componentes lógicos necesarios que hacen posible la realización de tareas específicas, en contraposición a los componentes físicos del sistema, llamados hardware. Tales componentes lógicos incluyen, entre muchos otros, aplicaciones informáticas —como el procesador de textos, que permite al usuario realizar todas las tareas concernientes a la edición de textos— o el software de sistema —tal como el sistema operativo, que, básicamente, permite al resto de los programas funcionar adecuadamente, facilitando la interacción con los componentes físicos y el resto de las aplicaciones, proporcionando también una interfaz para el usuario—.

**Topología**

La topología de red se define como la cadena de comunicación usada por los nodos que conforman una red para comunicarse. Un ejemplo claro de esto es la topología de árbol, la cual es llamada así por su apariencia estética, por la cual puede comenzar con la inserción del servicio de internet desde el proveedor, pasando por el router, luego por un switch y este deriva a otro switch u otro router o sencillamente a los hosts (estaciones de trabajo), el resultado de esto es una red con apariencia de árbol porque desde el primer router que se tiene se ramifica la distribución de internet dando lugar a la creación de nuevas redes o subredes tanto internas como externas. Además de la topología estética, se puede dar una topología lógica a la red y eso dependerá de lo que se necesite en el momento.

# **BIBLIOGRAFÍA**

## **LIBROS**

1. PRASAD, R. WLAN's and WPAN's towards 4G wireless. Londres-Inglaterra, edit, Artech House. 2004. 563 p.
2. RANDALL, K. Seguridad para comunicaciones inalámbricas. Madrid-España, edit, McGraw-Hill. 2003. 279 p.

## **INTERNET**

### **3. COMPARACIÓN REDES WLAN WPAN**

[http://www.unibague.edu.co/portal/programas/ingenieria\\_electronica/el\\_oraculo\\_wlan\\_wpan/cap2wlan.htm](http://www.unibague.edu.co/portal/programas/ingenieria_electronica/el_oraculo_wlan_wpan/cap2wlan.htm)

2011-01-20

### **4. ESTÁNDAR WIFI 802.11**

<http://standards.ieee.org/wireless>

<http://grouper.ieee.org/groups/802/11>

<http://www.wi-fiplanet.com/tutorials/article.php/2109571>

2011-01-03



## **5. HERRAMIENTAS DE MEDICIÓN**

### **Jperf**

<http://es.scribd.com/doc/36954104/Medicion-de-Ancho-de-Banda>

2011-02-09

### **Packet Analyzer**

<http://www.colasoft.com/purchase/capsaentprice.php>

2011-04-05

### **Wireshark**

<http://seguridadyredes.nireblog.com/post/2008/02/14/analisis-de-red-con-wireshark-interpretando-los-datos>

2011-03-15

### **WiSpy**

<http://www.metageek.net/products/wi-spy>

2011-03-27

## **6. XBEE**

<http://www.digi.com>

[http://www.olimex.cl/pdf/Wireless/ZigBee/XBee-Guia\\_Usuario.pdf](http://www.olimex.cl/pdf/Wireless/ZigBee/XBee-Guia_Usuario.pdf)

<http://www3.espe.edu.ec:8700/bitstream/21000/134/1/T-ESPE-029262.pdf>

2011-03-15

## **7. ZIGBEE**

<http://www.zigbee.org>

<http://standards.ieee.org/getieee802/802.15.4.pdf>

[http://www.worldlingo.com/ma/enwiki/es/IEEE\\_802.15.4](http://www.worldlingo.com/ma/enwiki/es/IEEE_802.15.4)

<http://www.ieee802.org>

<http://www.domodesk.com>

2011-01-24

# **ANEXOS**

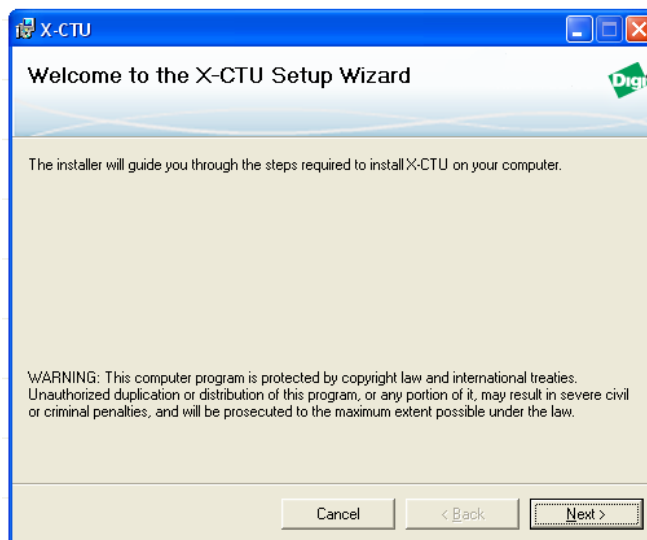
# ANEXO 1

## INSTALACION DE PROGRAMA X-CTU

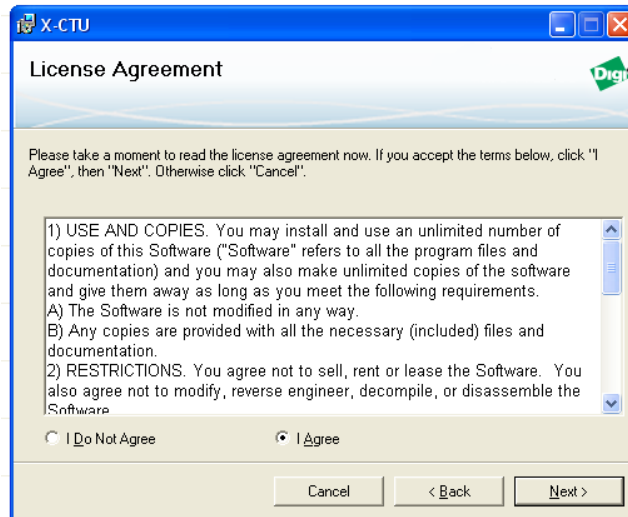
Antes de empezar con la configuración del módulo XBee tenemos que instalar el programa X-CTU. Aunque existen más programas en el mercado para la configuración del XBee, hemos escogido este porque es el que menos problemas presenta. Esta instalación se puede realizar tanto en linux (a través del programa wine) como en windows.

Primero debemos descargar el archivo instalable, que lo podemos encontrar en el siguiente enlace [http://ftp1.digi.com/support/utilities/40002637\\_c.exe](http://ftp1.digi.com/support/utilities/40002637_c.exe) una vez descargado el archivo procedemos a la instalación del programa haciendo doble click en dicho archivo.

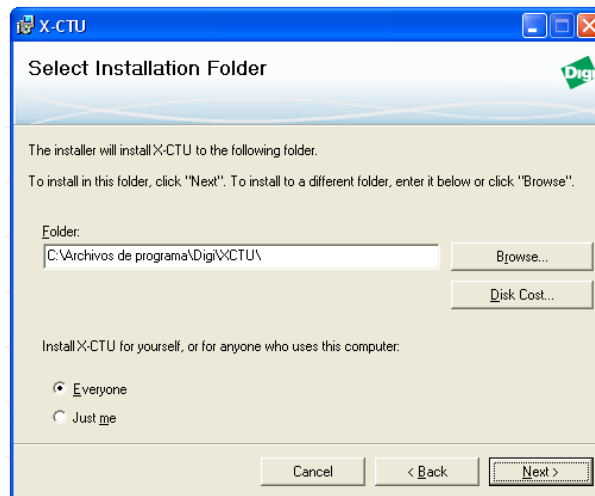
A continuación nos aparecerá la pantalla de bienvenida en la que pulsaremos el botón “Next”.



Nos aparecerá la siguiente pantalla de acuerdo de licencia, en la cual tendremos que seleccionar la opción “I Agree” y pulsar “Next”.



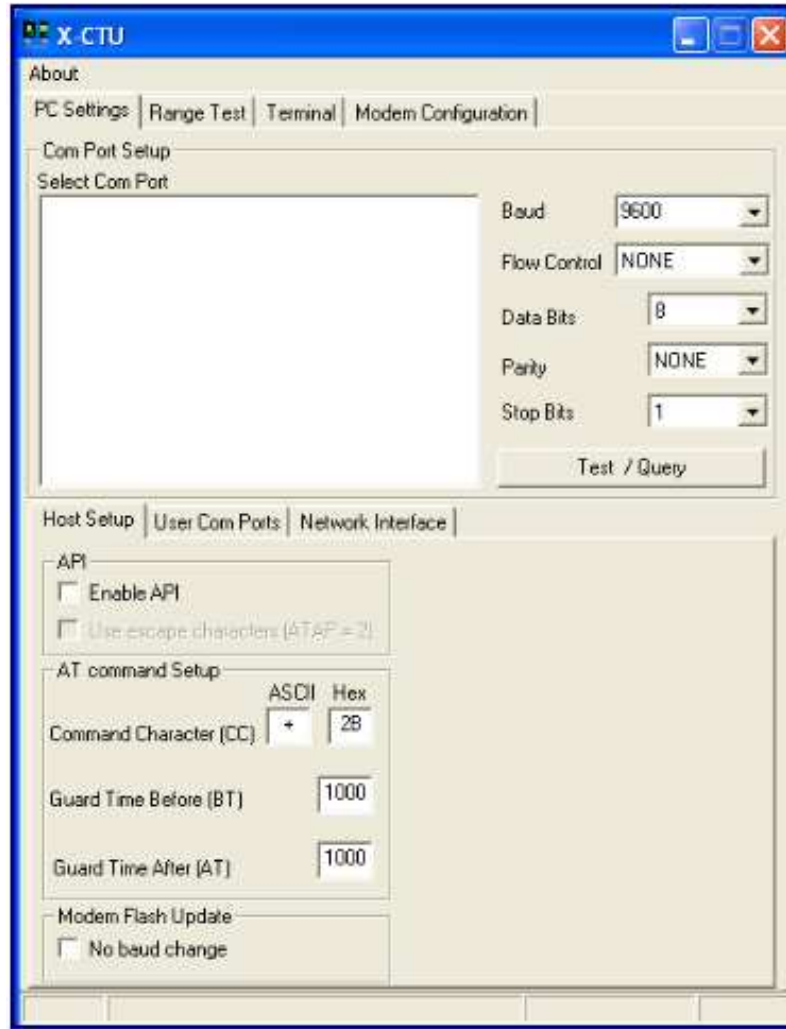
La siguiente pantalla es la de selección de la carpeta de instalación, si queremos cambiar la carpeta en la que queremos que se instale el programa pinchamos en “Browser”, sino dejamos la carpeta por defecto y pulsamos “Next”.



Nos aparecerá una pantalla de confirmación de instalación a la que le daremos al botón “Next” y justo después nos aparece una pantalla de actualización a la que pulsaremos el botón “Si”.

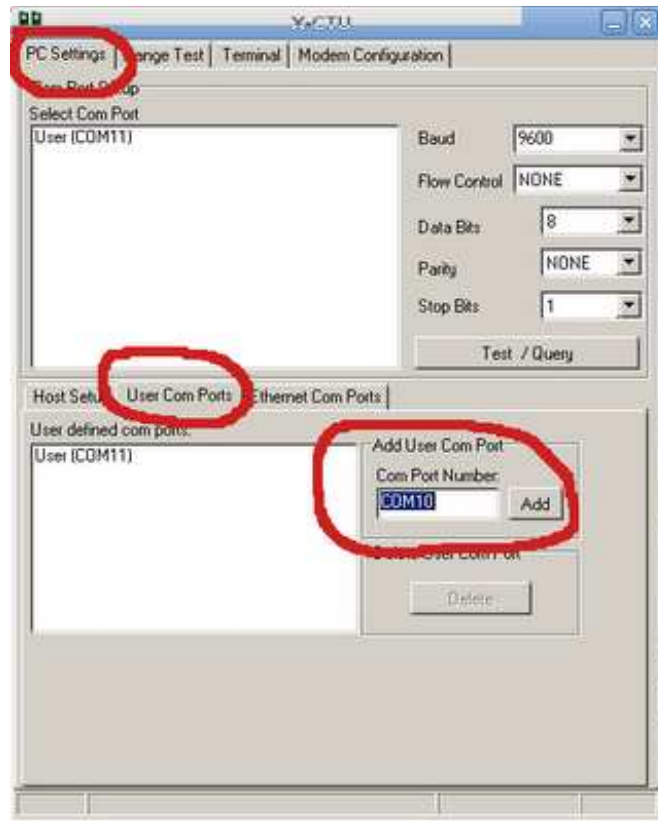
Una vez terminada la actualización, nos aparecerá una pantalla con la que nos informa que la instalación ha sido completada, pulsando en “Close” para terminar la instalación del programa.

Cuando hayamos finalizado la instalación podemos ejecutar el programa a través de un acceso directo ubicado en el escritorio, llamado X-CTU y nos parecerá una pantalla como la siguiente:

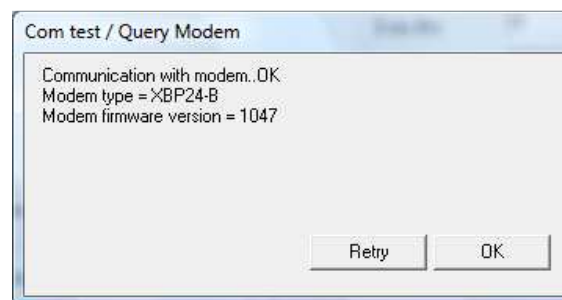


- **Configuración del puerto en X-CTU.**

Una vez que nos haya detectado el puerto, en nuestro caso el puerto USB, debemos añadirlo en el programa a través de la sección "User Com Ports" y en la parte que pone "Com Port Number" colocamos el nombre del COM al que se conecta la placa ZigBee. Podemos ver en la imagen de abajo, señalado en rojo, donde tenemos que realizar los cambios.



A continuación, después de añadir nuestro nuevo dispositivo, debemos señalar en la ventana "Select Com Port" dicho dispositivo, y seleccionamos el botón "Test/Query". Nos aparecerá una ventana como la que aparece en la siguiente imagen.



Si nos sale otro texto como "Unable to open com port" le cambiaremos el valor a la casilla "Baud" aunque el valor configurado de fábrica es "9600" pero tenemos que ir probando. Después de efectuar todo esto ya tendremos añadido el usb para poder configurar el módulo XBee.

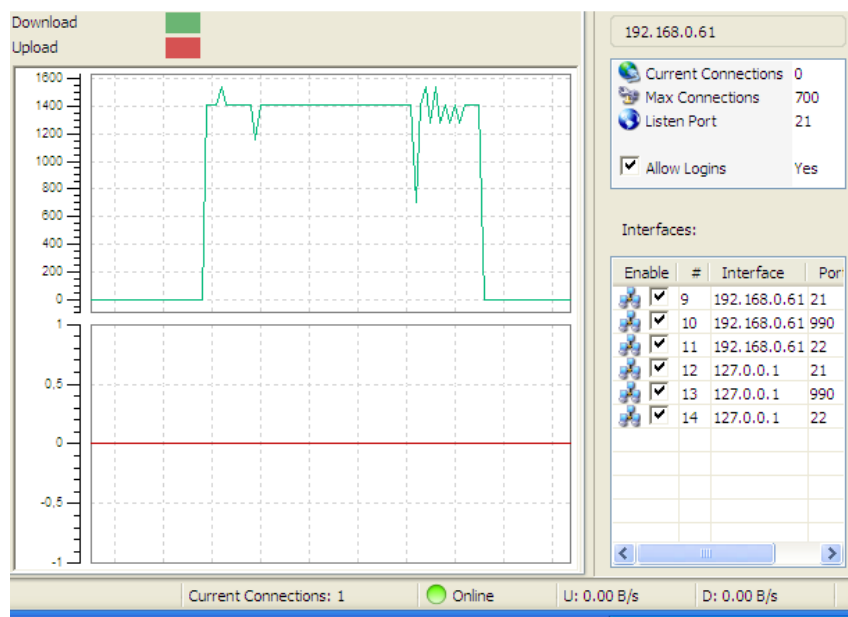
## ANEXO 2

### “EXPERIMENTOS 1 Y 2”

#### Experimento 1. *Análisis del tráfico de datos sin interferencia*

- ♦ **Distancia: 1 Metro, tráfico Wifi sin interferencia ZigBee**

Como habíamos mencionado para la transmisión Wifi desde la portátil hacia el servidor de archivos utilizaremos un archivo de 100 Mbytes. Una vez que se ha copiado en su totalidad tenemos los resultados que se muestra en la *Figura I*, aquí podemos distinguir entre otros aspectos, tiempo de inicio de la simulación, máxima velocidad y paquetes por segundo en la transferencia.

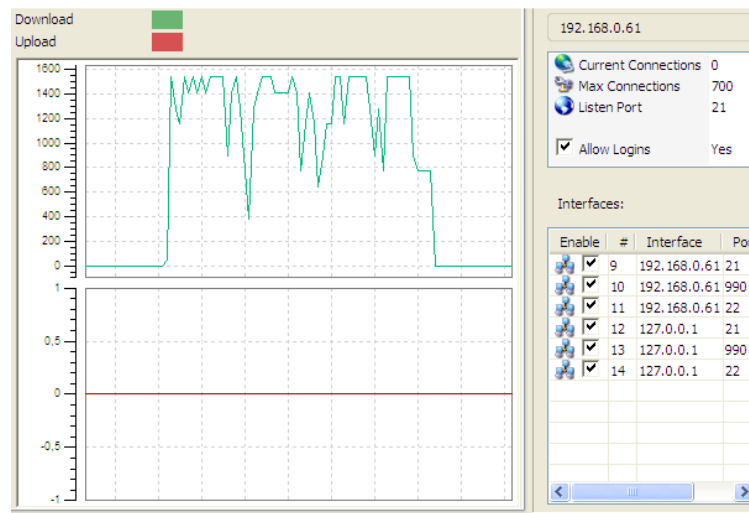


*Figura I. Análisis de tráfico wifi sin interferencia (d=1m)*



♦ **Distancia: 7 Metros, tráfico Wifi sin interferencia Zigbee**

Igualmente para la transmisión Wifi desde la portátil hacia el servidor de archivos utilizaremos un archivo de 100 Mbytes. Una vez que se ha iniciado la simulación tenemos los siguientes datos que se muestra en la *Figura II*, aquí podemos distinguir entre otros aspectos el tiempo de inicio de la simulación, máxima velocidad y paquetes por segundo.



*Figura II. Análisis de tráfico Wifi sin interferencia*

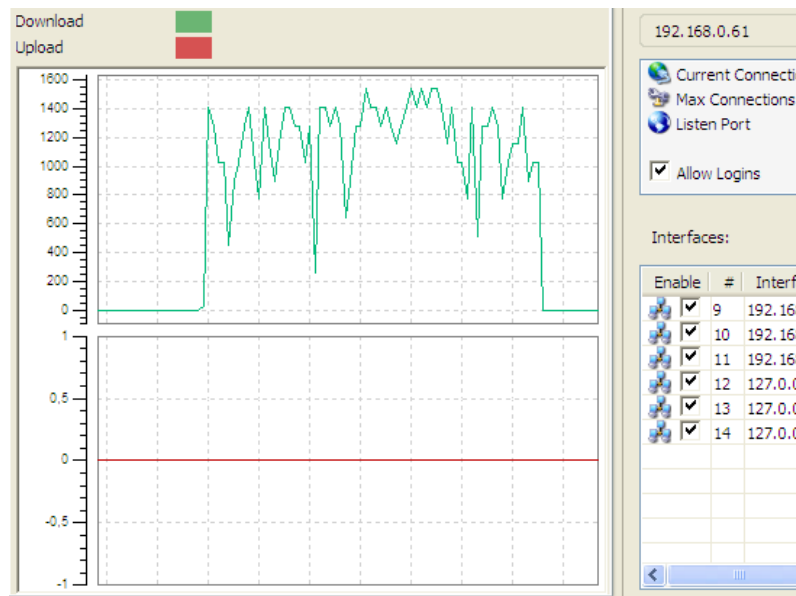
**Experimento 2. Análisis del tráfico de datos con interferencia ZigBee**

Para este experimento vamos a realizar la coexistencia en nuestra red de las dos tecnologías de estudio y por ende el análisis de la interferencia con una distancia de 1m, y 7m entre la laptop y la maquina que hace de servidor de archivos, ayudados nuevamente de la herramienta de Iperf. Para las pruebas de este experimento se copiará el mismo archivo de 100 Mbytes utilizado en el experimento anterior desde la

computadora portátil hacia el servidor de archivos, mientras que se transmitira paquetes de datos de 64 bytes entre los nodos de la red ZigBee.

♦ **Distancia: 1 Metro**

Para esta prueba durante la transmisión se tiene los siguientes datos en la pantalla que se muestra en la *Figura III*:



*Figura III. Análisis de tráfico wifi con interferencia (d=1m)*

## ANEXO 3

### “ANALIZADOR DE ESPECTROS PARA LA BANDA DE 2.4 GHZ: WI – SPY”

El Analizador de espectros utilizado es el ofertado por la empresa Metageek, consta en su parte hardware por una antena denominada Wy-Spy la cual tiene conexión USB (ver *Figura I*) y un programa software llamado Chanalyzer v2.1.7.



*Figura I. Chanalyzer Software para Wy-Spy (visualización de espectros)*

#### ♦ *Especificaciones*

- Ancho de banda: 2400 a 2483 MHz
- Resolución de frecuencia: 1,0 MHz
- Amplitud Rango: -97 dBm a -50 dBm
- Amplitud Resolución: 1,5 dBm

- Antena: interior, antena PCB Trace
- Sweep Time: 110 milisegundos

♦ **Requisitos**

- Puerto USB 1,1 o 2,0
- Windows 2000 o posterior. Net 2.0 (Participación de terceros en Mac OS X y Linux disponible)

Automáticamente después de conectar la tarjeta Wi-Spy, el software Chanalyzer puede iniciar su operación de análisis, cuando los datos han sido recogidos por Chanalyzer se tiene la posibilidad de la grabación (seleccione Archivo> Guardar Como...) del comportamiento del espectro electromagnético, grabación que puede ser útil y recuperado en cualquier momento para su estudio. Las grabaciones de Wi-Spy (archivos \*. wsr) requieren alrededor de 5 MB por cada hora de los datos registrados.

Chanalyzer proporciona la visualización de su red inalámbrica en gráficas de tres dimensiones (frecuencia, amplitud, y el tiempo). Al utilizar los tres puntos de vista en la mayoría de casos las interferencias pueden ser rápidamente identificadas. Específicamente ayuda a identificar las interferencias entre dispositivos de las siguientes tecnologías:

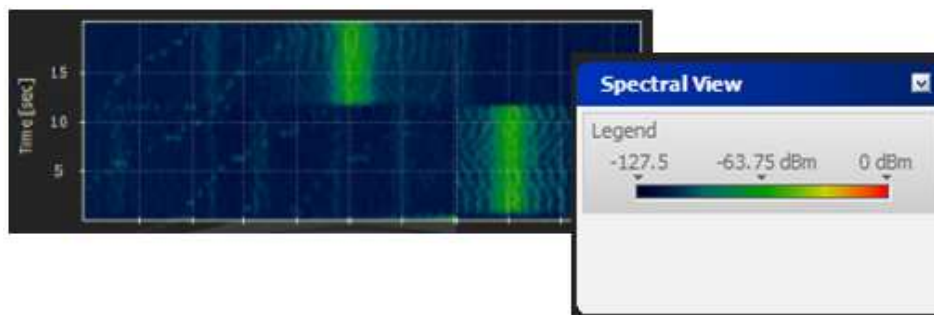
- *Wi-Fi*: Ver imágenes y grabaciones de diferentes routers inalámbricos 802.11b/g/n
- *Microondas*
- *Teléfonos inalámbricos*: teléfonos de 2,4 GHz

- *Vídeo y dispositivos de audio*: dispositivos inalámbricos que transmiten los medios de comunicación, algunos de ellos incluso evitar la interferencia inalámbrica.
- *Otros dispositivos*: alarmas de automóviles y otros dispositivos de 2,4 GHz.

La ventana principal del analizador de espectros permite la visualización de tres gráficas:

♦ ***Vista Espectral.-***

La vista espectral contiene una cascada de gráficos, muestra la amplitud en el tiempo para cada frecuencia. Con base en el calendario, se añade la línea espectral a la vista cada X segundos o minutos. El color de cada frecuencia y la hora de coordinar representa la amplitud de esa frecuencia, con el azul oscuro que representa las amplitudes de baja y de color rojo brillante que representan a las amplitudes de alta como se indica en la *Figura II*:

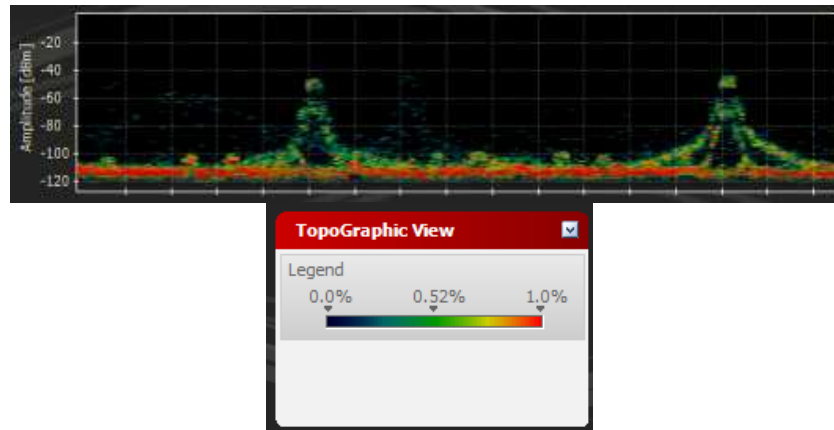


*Figura II. Vista espectral de Wi-Spy*

♦ ***Vista Topográfica***

La opción de “topographic” contiene la amplitud vs frecuencia gráfico similar a la vista planar, pero en lugar de mostrar la actual amplitud de cada frecuencia se pone de manifiesto el promedio de cada frecuencia y amplitud durante el tiempo en pantalla.

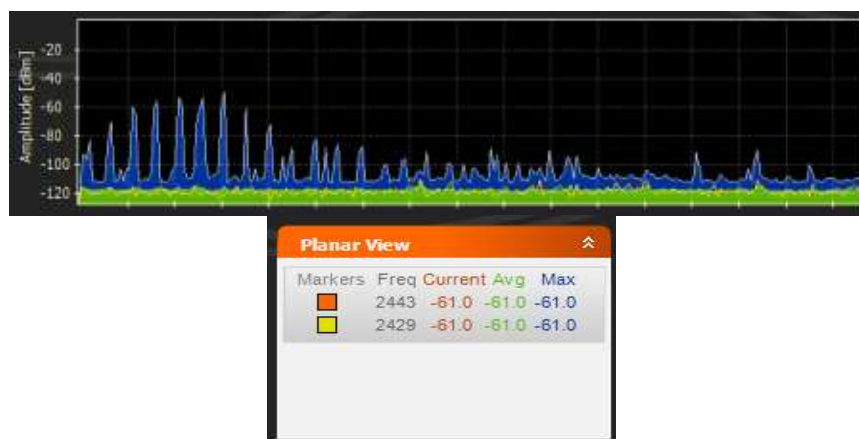
La coloración de la vista topográfica es similar a la vista espectral con azul oscuro están bajos y de color rojo brillante está alto, pero los colores que ahora representa el promedio en lugar de la amplitud (ver Figura III).



*Figura III. Vista topográfica de Wi-Spy*

### ***Vista Planar:***

Esta vista muestra una gráfica más de amplitud de frecuencia de visualización. La línea roja muestra la amplitud actual, el verde muestra el promedio de amplitud, y el azul muestra el máximo de amplitud. (ver Figura IV).



*Figura IV. Vista planar de Wi-Spy*

Chanalyzer también proporciona un análisis de todos los canales Wi-Fi (ver Figura IV). Para esto se debe seleccionar la opción "Wi-Fi Informe" desde el menú Informes para obtener información detallada sobre cada uno de los canales, incluido un compuesto "grado". El grado es una medida de la tranquilidad del canal, esta medida es mas alta mientras, más silencioso se encuentre el canal.



Channel	Grade	Duty Cycle	Average Floor (dBm)	Average Peak (dBm)
1	50 (F)	26.4	-94.1	-61
2	42 (F)	30	-93.1	-58.1
3	46 (F)	28.4	-93.8	-58.1
4	55 (F)	25.4	-95.3	-56.4
5	66 (D)	20	-97.5	-56.9
6	79 (C+)	13.5	-100.2	-60.8
7	82 (B-)	11.4	-100.6	-56.3
8	86 (B)	8.5	-101.6	-57.7
9	89 (B+)	6.9	-102.3	-61.8
10	89 (B+)	7	-102.4	-62.8
11	86 (B)	8.6	-101.8	-58
12	85 (B)	8.4	-102	-58.7
13	85 (B)	8.2	-102.4	-57.9

Figura IV. Ventana de "Informes" de canales Wi-Fi

## ANEXO 4

### “EXPERIMENTOS 3 Y 4”

#### **Experimento 3.- *Análisis del tráfico de datos en capa física (Espectros Zigbee)***

En este experimento, analizamos el efecto de la interferencia a nivel de capa uno del modelo OSI en la coexistencia de dispositivos zigbee y wifi para esto en el escenario de la figura IV.2 utilizamos un Analizador de espectros, debido al alto costo que tiene un equipo como este en el mercado se adquirió una Analizador de espectros de bajo costo, específicamente para la banda de 2.4 Ghz banda objeto de nuestro estudio.

#### **DETALLES DEL EXPERIMENTO**

Ayudados del wi-spy de metageek, se realizará el análisis de espectros emitido por la tecnología zigbee, para esto en la topología de la figura IV.2 deshabilitamos la red inalámbrica y solamente realizamos intercambio de archivos entre dispositivos de la tecnología 80215.4.

Desde el modulo coordinador de transmiten paquetes de 64 bytes al modulo repetidor quien está con la tarjeta de Loopback para repetir todos los datos que recibe. Después de una simulación de 1 minuto obtienen las vistas en el Chanalyzer que se muestran en la

*Figura I:*





**Figura I. Vistas Espectral, Topológica y Planar de la comunicación ZigBee**

Como podemos observar en la grafica Planar es decir Amplitud vs Frecuencia, Zigbee ocupa toda la banda desde 2.4 Ghz hasta 2.5 Ghz concretamente hasta 2.482 Ghz.

En la vista topológica y espectral podemos observar que los niveles de transmisión se mantienen constantes en el tiempo usando el medio de transmisión con señales de una mayor potencia (se tiene un pico máximo de -49 dbm y un pico mínimo de -91 dbm) al momento en que se realiza transmisión e intercambio de datos en la red zigbee armada para el experimento.

Ayudándonos de la opción reportes del Chanalyzer, se obtiene el reporte de la simulación esto dividido en los canales de Wifi (ver Tabla I):

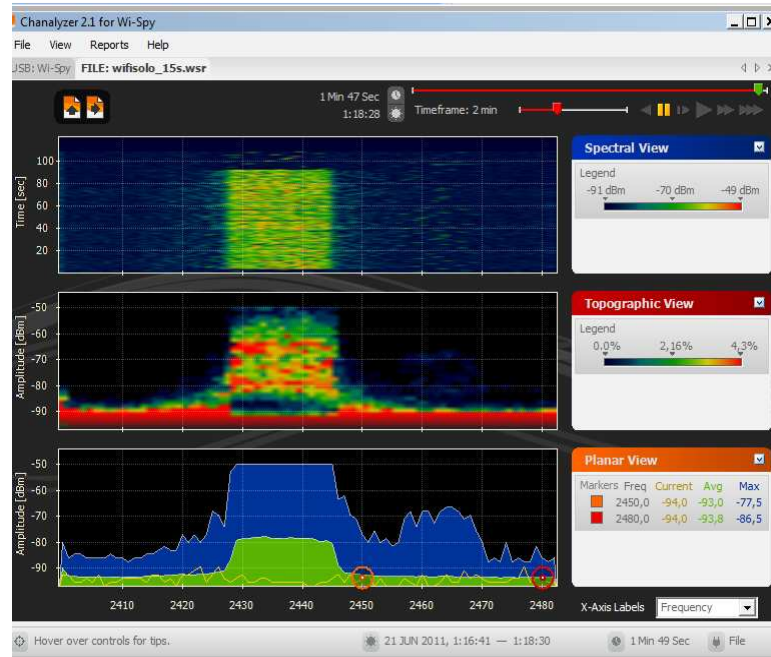
**Tabla I. Reporte de comunicación Zigbee dividido en canales**

<b>CHANNEL</b>	<b>GRADE (%)</b>	<b>DUTY CYCLE</b>	<b>AVERAGE FLOOR(DBM)</b>	<b>AVERAGE PEAK (DBM)</b>
11	78,43782	3,82098	-92,81281	-75
12	75,70728	5,123116	-91,49184	-57
13	78,1005	4,146985	-92,57224	-74,5
14	78,58669	4,026382	-92,72362	-82,75
15	79,46231	3,324121	-93,34988	-84
16	79,83794	3,21608	-93,38568	-58
17	80,48681	2,868719	-93,69409	-56,5
18	80,38693	2,91206	-93,66772	-58,5
19	81,04837	2,650126	-93,92085	-75
20	81,35113	2,513191	-94,07538	-88,25
21	81,71734	2,376884	-94,18091	-87,5
22	81,58857	2,437814	-94,14259	-82,75
23	81,65892	2,393844	-94,17085	-85
24	81,48492	2,30402	-94,22613	-89
25	81,44221	2,346734	-94,21357	-88,75
26	81,66646	2,382538	-94,17902	-87,25

#### **Experimento 4: Análisis del tráfico de datos en capa física (Wifi)**

Una vez que hemos tenido las gráficas de espectros de la comunicación zigbee, se realizará una nueva variación en la topología de la figura IV.2, en la cual eliminamos en lo posible la conexión de dispositivos zigbee y habilitamos la red inalámbrica wifi.

Desde la computadora portátil vía wifi se copia un archivo de 100 Mb hacia el servidor de archivos. Después de una simulación de 1 minuto y 30 segundos se obtienen las vistas mostradas en la *Figura II*:



**Figura II. Vistas Espectral, Topológica y Planar de la comunicación Wi-Fi**

Como podemos observar en la grafica Planar, Amplitud vs Frecuencia, la comunicación wifi se concentra principalmente en el canal 6 específicamente entre 2.426 a 2.448, ya que el Access Point y las estaciones están configuradas para utilizar este canal, igualmente podemos ver que existen picos de ruido para el resto de la banda.

En la vista topológica se tiene una gráfica en la que los picos más altos de la señal wifi se encuentran en el canal 6 llegando a tener una potencia máxima en transmisión de información de  $-38$  dbm y el pico mínimo de  $-55$  dbm.

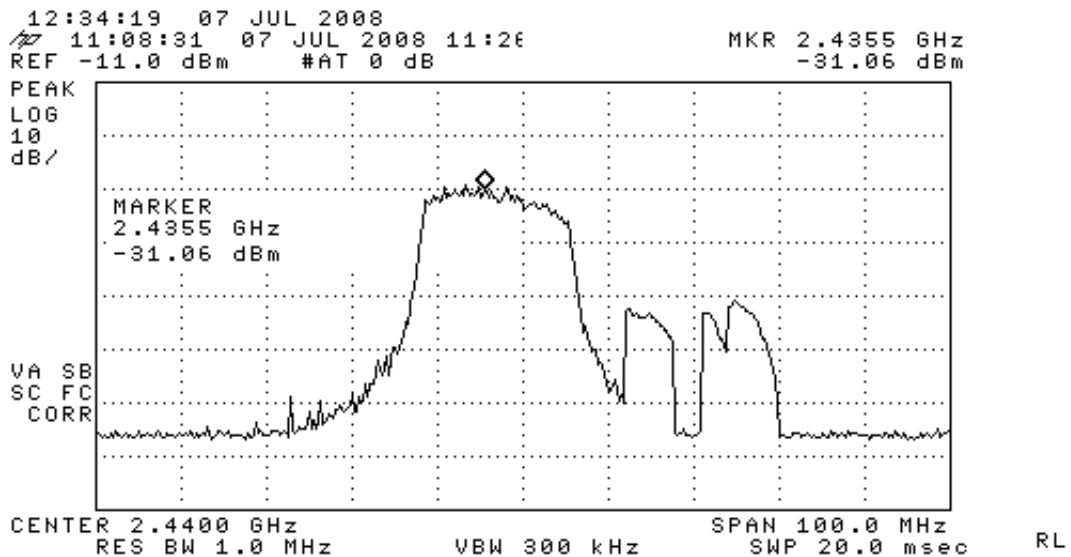
En lo que respecta a la vista espectral se puede observar que el un flujo intenso de información constante en el tiempo se tiene nuevamente solo en el canal 6.

Ayudándonos de la opción reportes del Chanalyzer, se obtiene el siguiente reporte de la simulación esto nuevamente dividido en los canales de wifi (ver *Tabla II*).

**Tabla II. Reporte de comunicación Wi-Fi dividido en canales wi-fi**

CHANNEL	GRADE (%)	DUTY CYCLE	AVERAGE FLOOR(DBM)	AVERAGE PEAK (DBM)
1	79,50204	3,207783	-93,46351	-84,34782
2	73,41887	3,786491	-92,91256	-80,63043
3	61,35938	7,073661	-89,67352	-72,86957
4	57,86559	10,3487	-86,4407	-65,1087
5	54,82987	13,38441	-83,4311	-58,26087
6	53,55843	14,65586	-82,17459	-54,47826
7	55,161	13,05328	-83,74603	-58,26087
8	58,79852	9,781833	-86,97671	-63,86956
9	62,41344	6,530765	-90,17993	-68,23913
10	75,96089	3,456522	-93,20119	-72,21739
11	80,04222	2,980105	-93,64626	-75,41304
12	80,54124	2,831522	-93,78378	-76,84782

Una similar prueba se realizó en un analizador de espectros de la Super Intendencia de Telecomunicaciones no con la topología del experimento pero es interesante comparar los resultados con el equipo utilizado, las gráficas son muy similares como se puede ver en la *Figura III*.



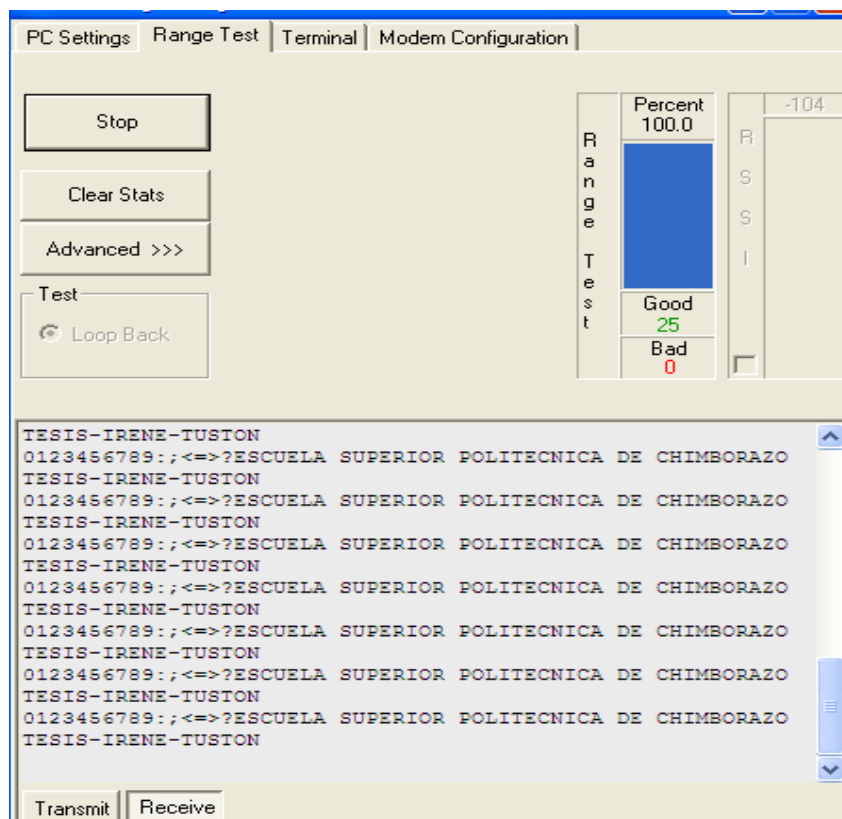
**Figura III. Imagen de espectros de la comunicación Wifi**

## ANEXO 5

### EXPERIMENTO 5. ANÁLISIS DE INTERFERENCIA EN CAPA FÍSICA ENTRE LA COMUNICACIÓN ZIGBEE Y WIFI

#### DETALLES DEL EXPERIMENTO

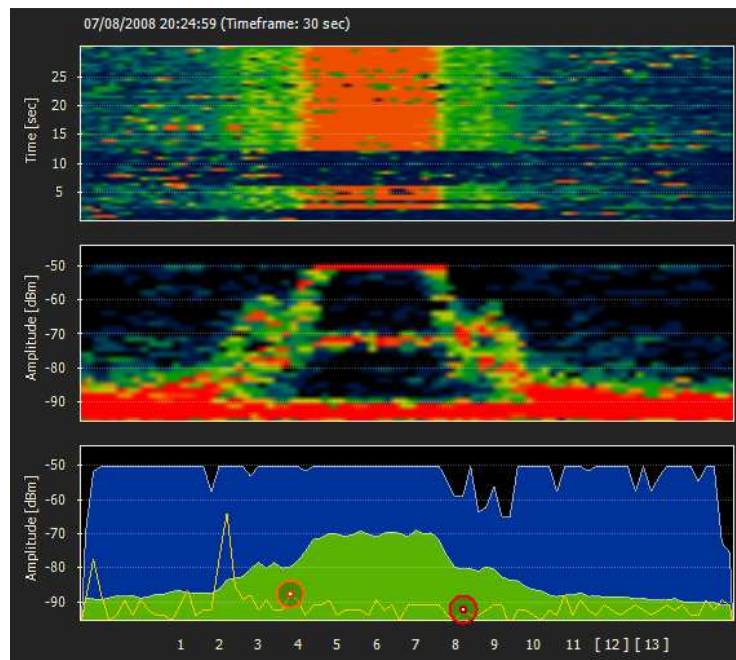
Haciendo referencia a la *Figura I.*, para este experimento desde la computadora portátil se copia un archivo de 100 Mb hacia el servidor de archivos, al mismo tiempo desde el modulo coordinador de la red Zigbee se se envia y recibe paquetes de datos de 64 bytes desde el modulo repetidor.



*Figura I. Experimento*

A nivel de capa 1 y con la ayuda del Analizador de Espectros Wi – Spy tenemos las siguientes simulaciones:

Después de 101 segundos de simulación se tiene como Resultado las siguientes vistas mostradas en la *Figura II*:



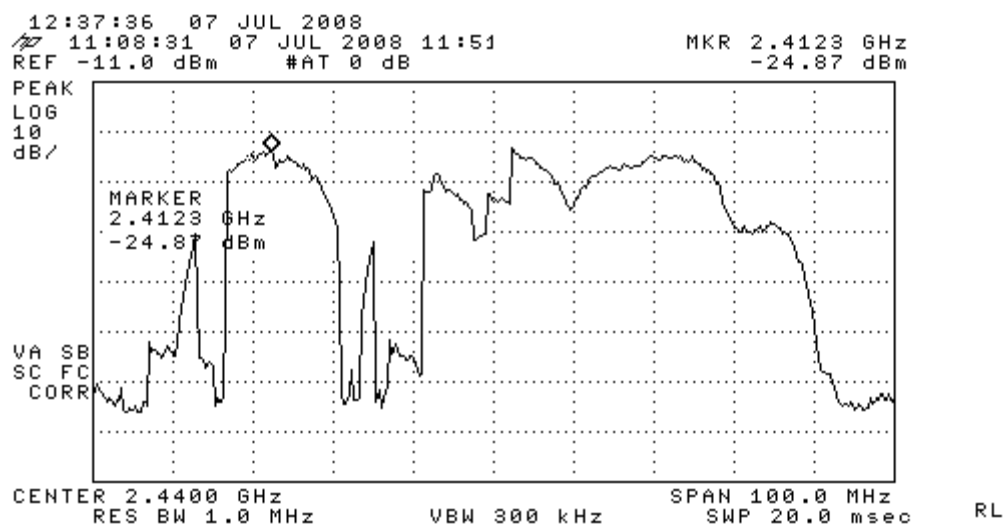
**Figura II.** *Vistas Espectral, Topológica y Planar de la interferencia Zigbee en la comunicación Wi-Fi*

En la Vista Planar podemos observar claramente la utilización completa del canal, si nos acordamos es debido a la tecnología zigbee con picos máximos de hasta  $-24.87$  dbm esto debido a la suma de las señales wifi y zigbee. Igualmente podemos ver en la gráfica promedio (color verde) que los picos más altos se forman en el canal 6 en el orden de los  $-70$  dbm y picos mínimos en alrededor  $-90$  dbm.

Igualmente en la vista topológica se puede ver la deformación de la gráfica wifi en comparación con la del experimento 3, esto debido a la interferencia de las señales de ruido y principalmente de la comunicación zigbee.

En la vista espectral en cambio podemos darnos cuenta que la transmisión wifi mantiene un flujo intenso de datos en el canal 6 hasta 12 segundos antes de concluir la simulación es aquí donde ya está terminando de copiar el archivo en el servidor

Al igual que como en el experimento anterior al utilizar un analizador de espectros en la Super Intendencia de Telecomunicaciones se obtuvo la *Figura III*, similar a la de wi-spy, recordando que el ambiente de simulación no es el mismo ya que se realizó en la Super Intendencia de telecomunicaciones ya que es aquí el único lugar en la ciudad donde se dispone de este equipo.



*Figura III. Diagrama de espectros de la interferencia Zigbee en la comunicación Wi-Fi*

Como resultados de este experimento se pueden resaltar los siguientes:

- ♦ El archivo copiado desde la portátil hacia el servidor de archivos, es decir vía wifi tuvo un tiempo de duración de 90 segundos.
- ♦ Mientras que el archivo copiado hacia el mismo servidor de archivos pero con interferencia zigbee tuvo un tiempo de duración de 101 segundos.

*Tabla I. Reporte de la interferencia Zigbee en Wi-Fi dividido en canalescWifi*

<b>CHANNEL</b>	<b>GRADE (%)</b>	<b>DUTY CYCLE</b>	<b>AVERAGE FLOOR(DBM)</b>	<b>AVERAGE PEAK (DBM)</b>
1	77,26219	4,186408	-92,50935	-66,93478
2	72,55425	4,845286	-91,87546	-64,91304
3	61,72318	7,557192	-89,20551	-63,86956
4	59,0065	10,27387	-86,52509	-61,65217
5	56,27468	13,00569	-83,8203	-56,69565
6	55,25396	14,02641	-82,8013	-53,8913
7	56,84721	12,43316	-84,36835	-58,3913
8	59,99908	9,379419	-87,3785	-63,93478
9	63,34559	6,331979	-90,37983	-67,97826
10	75,29906	3,549065	-93,11479	-71,82609
11	80,0961	3,018387	-93,61235	-74,43478
12	80,57639	2,804449	-93,8078	-76,26087



## ANEXO 6

### “VALORES DE $\chi^2$ Y PROBABILIDADES”

Degrees of Freedom	Possibility of Chance Occurrence in Percentage (5% or Less Considered Significant)								
	90%	80%	70%	50%	30%	20%	10%	5% (sig.)	1%
1	0.016	0.064	0.148	0.455	1.074	1.642	2.706	3.841	6.635
2	0.211	0.446	0.713	1.386	2.408	3.219	4.605	5.991	9.210
3	0.584	1.005	1.424	2.366	3.665	4.642	6.251	7.815	11.341
4	1.064	1.649	2.195	3.357	4.878	5.989	7.779	9.488	13.277
5	1.610	2.343	3.000	4.351	6.064	7.289	9.236	11.070	15.086
6	2.204	3.070	3.828	5.348	7.231	8.558	10.645	12.592	16.812
7	2.833	3.822	4.671	6.346	8.383	9.083	12.017	14.067	18.475
8	3.490	4.594	5.527	7.344	9.524	11.030	13.362	15.507	20.090
9	4.168	5.380	6.393	8.343	10.656	12.242	14.684	16.919	21.666

