

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY



**TECNOLÓGICO
DE MONTERREY.®**

"Análisis de relaciones entre QoS y SNR en WLANs 802.11b y 802.11g"

Autor

Rogelio Herrerías Hernández

**Sometido al Programa de Graduados en Informática y
Computación en cumplimiento parcial con los
requerimientos para obtener el grado de:**

Maestro en Ciencias de la Computación

Asesor

Dr. Jesús Arturo Pérez Díaz

Cuernavaca, Morelos. Mayo de 2008.

Análisis de relaciones entre QoS y SNR en WLANs 802.11b y 802.11g

Presentada por:

Rogelio Herrerías Hernández

Aprobada por:

Dr. Jesús Arturo Pérez Díaz

Director del Departamento de Tecnologías de Información y Mecatrónica

ITESM Campus Cuernavaca

Asesor de Tesis

Dr. Víctor Hugo Zárate Silva

Profesor Investigador del Departamento de Tecnologías de Información y

Mecatrónica

ITESM Campus Cuernavaca

Sinodal

Dr. Joaquín García Hernández

Investigador de la Unidad de Control e Instrumentación

Instituto de Investigaciones Eléctricas

IIE Cuernavaca Morelos

Sinodal

DEDICATORIA

***A MIS PADRES, LUCRECIA HERNÁNDEZ VALENZUELA Y
ROGELIO HERRERÍAS MUÑOZ POR SUS ORACIONES Y
APOYO INCONDICIONAL EN TODO MOMENTO. “GRACIAS
DIOS POR LOS PADRES QUE ME HAS DADO”.***

***A MI AMADA LIDIA GUERRERO CALDERÓN, QUIEN FUE
MI PRINCIPAL MOTIVACIÓN DURANTE MIS ESTUDIOS DE
POSGRADO. “GRACIAS AMOR POR SIEMPRE ESTAR A MI
LADO Y GRACIAS TAMBIÉN POR TUS ORACIONES”.***

AGRADECIMIENTOS

A DIOS PRIMERAMENTE, POR PROVEERME DE TODO LO NECESARIO PARA ESTE LOGRO. “GRACIAS AMADO SEÑOR POR TU FIDELIDAD Y MISERICORDIA. EN TI CONFÍO ¡ABBA, PADRE!”.

A MI ASESOR DE TESIS, DR. JESÚS ARTURO PÉREZ DÍAZ POR HABER TENIDO SIEMPRE DISPONIBILIDAD PARA ORIENTARME EN LA REALIZACIÓN DE LA TESIS Y COMPARTIR CON MIGO SUS CONOCIMIENTOS DEL ÁREA DE REDES, ADEMÁS DE MOSTRARSE SIEMPRE AMABLE Y PACIENTE HACIA MÍ.

A MIS SINODALES, DR. VÍCTOR HUGO ZÁRATE SILVA Y DR. JOAQUÍN GARCÍA HERNÁNDEZ POR EL TIEMPO QUE DEDICARON REVISANDO MI TESIS.

A MIS AMIGOS, ERNESTO JESÚS RIVERA LARA Y JOEL C. FLORES ESCALANTE PORQUE SIEMPRE ME BRINDARON AYUDA CUANDO LA NECESITÉ.

A TODOS AQUELLOS QUE DE ALGUNA MANERA CONTRIBUYERON A ALIGERAR UN POCO LAS CARGAS.

“QUE DIOS LES BENDIGA RICA Y PODEROSAMENTE”.

RESUMEN

Este trabajo tiene el objetivo de definir modelos matemáticos entre el índice de señal a ruido (SNR) y la calidad de servicio (QoS) tanto de una WLAN 802.11b como también de una WLAN 802.11g en términos de retardo, jitter y pérdida de paquetes TCP. Así también uno de los objetivos es el de hallar las razones de proporcionalidad de el retardo, el jitter y el porcentaje de paquetes perdidos entre ambos estándares. Para poder encontrar estos modelos matemáticos y proporciones se realizó un trabajo experimental para poder analizar cómo el SNR afecta el rendimiento del tráfico TCP en una WLAN 802.11b y en una WLAN 802.11g. Algunas conclusiones importantes obtenidas en esta tesis se describen a continuación:

- Se obtuvieron modelos lineales que relacionan el retardo de los paquetes TCP y el SNR en ambas WLANs, 802.11b y 802.11g.
- Para el jitter se obtuvieron modelos exponenciales para ambos estándares de WLANs.
- También se obtuvieron modelos exponenciales para el porcentaje de paquetes perdidos en ambos estándares de WLANs.
- De la comparación entre el jitter de ambas WLANs se concluye que el jitter de 802.11b es mayor al de 802.11g con la única excepción del último nivel de SNR, el SNR₉ que va de [19dB-14dB].
- Las razones de proporcionalidad resultantes para retardos, jitter y porcentajes de paquetes perdidos entre el estándar 802.11b al 802.11g obtenidas de las medias de los parámetros con respecto a nueve niveles de SNR rebasan la unidad, lo que indica que los tres parámetros son mayores en la WLAN 802.11b.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN.....	I
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	II
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IV
ÍNDICE DE TABLAS.....	V

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 ANTECEDENTES.....	1
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.3 OBJETIVO GENERAL.....	3
1.3.1 OBJETIVOS PARTICULARES.....	3
1.4 ALCANCES Y LIMITACIONES.....	4
1.5 TRABAJOS RELACIONADOS.....	5
1.6 METODOLOGÍA DE DESARROLLO.....	6
1.7 DESCRIPCIÓN BREVE DE LOS CAPÍTULOS.....	7

CAPÍTULO 2. CONCEPTOS Y TECNOLOGÍAS BASE.....	9
2.1 INTRODUCCIÓN A LAS WLANS.....	9
2.2 ESTANDARIZACIÓN DE TECNOLOGÍAS WLAN.....	12
2.2.1 IEEE 802.11.....	13
2.2.2 IEEE 802.11b.....	13
2.2.3 IEEE 802.11a.....	14
2.2.4 IEEE 802.11g.....	16
2.2.5 IEEE 802.11n.....	18
2.3 TCP Y SU COMPORTAMIENTO EN REDES INALÁMBRICAS.....	19
2.4 CALIDAD DE SERVICIO QoS.....	21
2.5 LATENCIA.....	22
2.6 JITTER.....	23
2.7 PÉRDIDA DE PAQUETES.....	24
2.8 ÍNDICE DE SEÑAL-RUIDO SNR.....	24

CAPÍTULO 3. AMBIENTE DE PRUEBAS E IMPLEMENTACIÓN.....	26
3.1 HARDWARE.....	26
3.2 ENTORNO EXPERIMENTAL.....	27
3.3 CASOS DE PRUEBAS.....	28
3.4 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	30

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	33
4.1.1 ANÁLISIS DEL RETARDO PARA 802.11b.....	34
4.1.2 ANÁLISIS DEL JITTER PARA 802.11b.....	35
4.1.3 ANÁLISIS DE PAQUETES PERDIDOS PARA 802.11b.....	37
4.2.1 ANÁLISIS DE LOS RETARDOS EN EL ESTÁNDAR 802.11g.....	39
4.2.2 ANÁLISIS DEL JITTER EN EL ESTÁNDAR 802.11g.....	41
4.2.3 ANÁLISIS DEL PORCENTAJE DE PAQUETES PERDIDOS EN EL ESTÁNDAR 802.11g.....	43
4.3.1 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS RETARDOS ENTRE EL ESTÁNDAR 802.11b	

Y EL ESTÁNDAR 802.11g.....	45
4.3.2 ANÁLISIS COMPARATIVO DEL JITTER ENTRE EL ESTÁNDAR 802.11b Y EL ESTÁNDAR 802.11g.....	46
4.3.3 ANÁLISIS COMPARATIVO DEL PORCENTAJE DE PAQUETES PERDIDOS ENTRE EL ESTÁNDAR 802.11b Y EL ESTÁNDAR 802.11g.....	47
4.4 ANÁLISIS DE LA PROPORCIONALIDAD ENTRE LOS PARÁMETROS DE RENDIMIENTO DE AMBOS ESTÁNDARES.....	48
4.4.1 ANÁLISIS DE LA PROPORCIÓN ENTRE LOS RETARDOS DE LOS PAQUETES DE AMBOS ESTÁNDARES.....	49
4.4.2 ANÁLISIS DE LA PROPORCIÓN ENTRE EL JITTER DE LOS PAQUETES DE AMBOS ESTÁNDARES.....	50
4.4.3 ANÁLISIS DE LA PROPORCIÓN ENTRE EL PORCENTAJE DE PAQUETES PERDIDOS DE LOS PAQUETES DE AMBOS ESTÁNDARES.....	51
4.5 ANÁLISIS DE QoS NECESARIA PARA VoIP.....	52
4.5.1 JITTER Y PORCENTAJE DE PAQUETES PERDIDOS NECESARIOS EN UNA BUENA QoS PARA VoIP.....	52
4.5.2 RETARDOS CON NIVELES DE SNR ADECUADOS PARA UNA BUENA QoS PARA VoIP.....	53
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	56
5.1 CONCLUSIONES.....	56
5.2 TRABAJOS FUTUROS.....	60
REFERENCIAS.....	62

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.6 CONFIGURACIÓN DE LA RED DE PRUEBA.....	6
FIGURA 2.2 MODELO OSI PARA WLANs.....	12
FIGURA 2.2.2 CANALES DE FRECUENCIA DE LA BANDA 2.4 GHZ.....	14
FIGURA 2.2.4 DISTANCIAS DE COBERTURA DEL ESTÁNDAR 802.11g.....	17
FIGURA 2.2.5 ESQUEMA DE UN CANAL MIMO DONDE SE MUESTRAN LOS ARREGLOS DE ANTENAS TRANSMISORAS Y RECEPTORAS.....	19
FIGURA 2.6 SE MUESTRA UNA COMPARATIVA ENTRE LA SEÑAL IDEAL SIN JITTER Y UNA SEÑAL CON VARIACIONES DE 20.3 ns. Y 10 ns. EN EL TIEMPO.....	23
FIGURA 3.2 ENTORNO DE PRUEBAS.....	27
FIGURA 3.3 NIVELES DE SNR.....	29
FIGURA 4.1.1 GRÁFICA DE LOS RETARDOS DEL ESTÁNDAR 802.11b.....	35
FIGURA 4.1.2 GRÁFICA DEL JITTER EN EL ESTÁNDAR 802.11b.....	37
FIGURA 4.1.3 PORCENTAJE DE PAQUETES PERDIDOS PARA EL ESTÁNDAR 802.11b.....	39
FIGURA 4.2.1 GRÁFICA DE LOS RETARDOS DEL ESTÁNDAR 802.11g.....	41
FIGURA 4.2.2 GRÁFICA DE JITTER EN EL ESTÁNDAR 802.11g.....	43
FIGURA 4.2.3 PORCENTAJE DE PAQUETES PERDIDOS PARA EL ESTÁNDAR 802.11g.....	45
FIGURA 4.3.1 COMPARATIVA ENTRE AMBAS CURVAS DE RETARDOS.....	46
FIGURA 4.3.2 COMPARATIVA ENTRE AMBAS CURVAS DE JITTER.....	47
FIGURA 4.3.3 COMPARATIVA ENTRE AMBAS CURVAS DE PORCENTAJE DE PAQUETES PERDIDOS.....	48
FIGURA 4.4.1 RAZONES DE PROPORCIONALIDAD DEL RETARDO DEL ESTÁNDAR 802.11b AL RETARDO DEL ESTÁNDAR 802.11g.....	49
FIGURA 4.4.2 RAZONES DE PROPORCIONALIDAD DEL JITTER DEL ESTÁNDAR 802.11b AL JITTER DEL ESTÁNDAR 802.11g.....	50
FIGURA 4.4.3 RAZONES DE PROPORCIONALIDAD DEL PORCENTAJE DE PAQUETES PERDIDOS DEL ESTÁNDAR 802.11b AL PORCENTAJE DE PAQUETES PERDIDOS DEL ESTÁNDAR 802.11g.....	51
FIGURA 4.5.2 NIVELES DE SNR QUE NO SUPERAN LOS 150 ms.....	54

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.2.3 ESQUEMAS DE MODULACIÓN.....	15
TABLA 2.2.4 VELOCIDADES TEÓRICAS DEL ESTÁNDAR 802.11g.....	17
TABLA 3.3.1 RANGOS DE NIVELES DE SNR PARA 802.11b.....	30
TABLA 3.3.2 RANGOS DE NIVELES DE SNR PARA 802.11g.....	30
TABLA 4.1 REGRESIONES EVALUADAS PARA SELECCIONAR EL MEJOR MODELO.....	33
TABLA 4.1.1 TABLA DE VALORES UTILIZADOS EN LA OBTENCIÓN DEL MODELO (1).....	34
TABLA 4.1.2 TABLA DE VALORES UTILIZADOS EN LA OBTENCIÓN DEL MODELO (2).....	36
TABLA 4.1.3 TABLA DE VALORES UTILIZADOS EN LA OBTENCIÓN DEL MODELO (3).....	38
TABLA 4.2.1 TABLA DE VALORES UTILIZADOS EN LA OBTENCIÓN DEL MODELO (4).....	40
TABLA 4.2.2 TABLA DE VALORES UTILIZADOS EN LA OBTENCIÓN DEL MODELO (5).....	42
TABLA 4.1.3 TABLA DE VALORES UTILIZADOS EN LA OBTENCIÓN DEL MODELO (6).....	44
TABLA 4.4 RAZONES DE PROPORCIONALIDAD ENTRE LOS PARÁMETROS DE RENDIMIENTO DE AMBOS ESTÁNDARES.....	48
TABLA 4.5.1 MEDIAS DE JITTER Y PORCENTAJE DE PAQUETES PERDIDOS CON UDP.....	53
TABLA 4.5.2.1 MEDIAS DE RETARDOS CON UDP.....	54
TABLA 4.5.2.2 QoS PARA VoIP UTILIZANDO TCP Y UDP COMO PROTOCOLOS DE TRANSPORTE.....	55

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Este capítulo presenta el problema principal que motivó al desarrollo de esta tesis, mostrando un resumen de los antecedentes relacionados con el área de estudio, los objetivos que se esperan alcanzar, los trabajos relacionados, la metodología que se siguió para su desarrollo, así como una descripción breve de cada capítulo.

1.1 Antecedentes.

Desde que surgió la primera versión del estándar IEEE 802.11, se fueron desarrollando otros estándares que han ido introduciendo mejoras para lograr mayores velocidades en la transmisión de datos y solucionando inconvenientes por medio de la incorporación de otras técnicas de modulación de datos y nuevas tecnologías que permiten aumentar el ancho de banda.

Hasta antes del surgimiento del nuevo estándar IEEE 802.11n, los estándares de WiFi (IEEE 802.11) 802.11g y 802.11a, habían logrado alcanzar una velocidad teórica de transferencia máxima de 54Mbps, al igual que el estándar HiperLan2 propuesto por el ETSI (Instituto Europeo de Estandarización de Telecomunicaciones) que también alcanza los 54Mbps teóricos, [XIAO05]. Más sin embargo, a pesar de lograr estas velocidades, los estándares desarrollados no han conseguido optimizar las transmisiones de datos en términos de maximizar el ancho de banda bajo las condiciones de las RF (radio frecuencias).

Las comunicaciones basadas en VoIP (voz sobre IP) están teniendo un crecimiento exponencial, en cuanto a su utilización a nivel mundial. VoIP es la serie de protocolos usados para transmitir señales de voz sobre una red IP. VoIP utiliza el protocolo UDP para la transferencia de información y éste es un protocolo no orientado a conexión por lo que

no provee un mecanismo que asegure que los paquetes de datos han sido entregados en orden secuencial o provisto con garantías de calidad de servicio (QoS). Por lo que las implementaciones de VoIP enfrentan problemas con el manejo de la latencia y el jitter de los paquetes, los cuales son parámetros fundamentales para lograr que las comunicaciones sean en tiempo real, la latencia indica el retardo en el envío de paquetes desde la fuente al destino, o también es el retardo desde la fuente al destino más el retardo de regreso desde el destino a la fuente (tiempo de viaje redondo RTT), y el jitter es la variación de los tiempos de llegada entre paquetes consecutivos, Por ejemplo, siendo P_n y P_{n+1} dos paquetes consecutivos con T_n y T_{n+1} como sus tiempos de llegada respectivamente, el jitter entre estos dos paquetes es el siguiente: $Jitter = T_{n+1} - T_n$.

Las garantías de QoS son difíciles de lograr debido a los retardos de propagación de tiempo de viaje redondo (RTT) y a que el nodo receptor debe reestructurar los paquetes IP que llegan en desorden, a los retardos y pérdidas de los paquetes, mientras que al mismo tiempo se debe asegurar que los flujos de audio se mantengan consistentes en el tiempo.

La implementación de redes inalámbricas ha sido un reto debido a que los protocolos utilizados para las comunicaciones inalámbricas han tenido que ajustarse al funcionamiento de las redes IP, es decir, desde un inicio los protocolos para redes inalámbricas no fueron diseñados para optimizar las comunicaciones inalámbricas, sino más bien para integrarse al funcionamiento de las redes IP.

Resulta necesario encontrar de qué manera los parámetros que definen la QoS como el ancho de banda, latencia, jitter y porcentaje de paquetes perdidos se relacionan con el índice de señal-ruido (SNR) para que los diseñadores de redes puedan considerar estas relaciones y lograr que las redes sean capaces de soportar servicios de VoIP y otros servicios de tiempo real con la mayor QoS posible.

En este trabajo de investigación se analiza el rendimiento de una WLAN 802.11b y una WLAN 802.11g con el objetivo de hallar las relaciones existentes entre el SNR de las redes y los principales parámetros que determinan la QoS de una red, los cuales son el

ancho de banda, el retardo, el jitter y el porcentaje de paquetes perdidos. Además de que se busca encontrar las proporciones que existen en estos parámetros entre ambos estándares para WLANs.

1.2 Planteamiento del Problema.

Implementar redes IP inalámbricas con QoS suficiente para soportar servicios VoIP ha resultado una tarea difícil, debido principalmente a los problemas de latencia, jitter y pérdida de los paquetes de información, es decir, conseguir comunicaciones en tiempo real bajo un esquema de red IP resulta complicado por los retardos de propagación del medio, la pérdida de los paquetes y la necesidad de reestructuración del orden de los paquetes. Esta serie de problemas que conducen a la falta de garantías de QoS para comunicaciones de voz, hacen que sea necesario conocer de qué manera se relaciona la QoS de una red con el índice de señal-ruido (SNR).

1.3 Objetivo general.

Encontrar modelos matemáticos que describan las relaciones entre el índice de señal a ruido (SNR) y el rendimiento tanto de una red 802.11b como también de una red 802.11g en términos de retardo, jitter y pérdida de paquetes TCP. Así como también hallar las razones de proporcionalidad entre el retardo, el jitter y el porcentaje de paquetes perdidos entre ambos estándares.

1.3.1 Objetivos particulares.

- Hacer un análisis en ambas redes (802.11b y 801.11g) del comportamiento del tráfico TCP en base a los parámetros de rendimiento más importantes que determinan la QoS (retardo, jitter y porcentaje de paquetes perdidos).

- Obtener las relaciones entre el SNR y la QoS de una WLAN 802.11b y una WLAN 802.11g.
- Desarrollar una aplicación de software que sea capaz de procesar los datos producidos en las pruebas experimentales para la obtención del retardo, jitter y porcentaje de paquetes perdidos de los paquetes TCP.
- Analizar cómo se relaciona el comportamiento de ambas WLANs con la configuración del ambiente de pruebas.

1.4 Alcances y Limitaciones.

El alcance de la tesis es hacer un análisis detallado del comportamiento de la QoS en dos redes WLAN con diferentes estándares a diferentes niveles de SNR, donde los dos estándares estudiados son el 802.11b y el 802.11g y donde hay tres parámetros considerados en la definición de la QoS, los cuales son: retardo, jitter y porcentaje de paquetes perdidos. Con este análisis se pretende hallar modelos matemáticos que describan las relaciones entre la QoS y el SNR de las redes estudiadas además de las proporciones existentes entre la QoS de ambas redes desglosada en los tres parámetros analizados.

Un alcance más de esta tesis es el hecho de que la metodología de diseño, desarrollo y análisis presentada en este trabajo, sirve como un modelo de desarrollo para el análisis de los principales parámetros que definen el rendimiento de una WLAN, los cuales son: ancho de banda, retardo, jitter, porcentaje de paquetes perdidos y SNR. Por lo que este modelo bien puede servir para analizar el estándar 802.11n en el momento en que la versión final de éste estándar sea liberada.

Las limitaciones son en cuanto al entorno de pruebas ya que el entorno de pruebas utilizado contó únicamente con dos nodos conectados a las redes, los necesarios para poder medir la QoS en una conexión punto a punto utilizando todo el ancho de banda de las redes para las transmisiones de tráfico TCP analizadas, por lo que el ambiente de pruebas no

representó una red real típica multiusuario con aplicaciones que transmitan flujos de tráfico multimedia.

1.5 Trabajos relacionados.

El trabajo del doctor Jesús Arturo Pérez [PERE07] ha sido de utilidad debido a que realiza un análisis del comportamiento de una red WIMAX, que a pesar de ser una tecnología diferente a la del estándar 802.11 por ser diseñada para comunicaciones de banda ancha, la configuración de su entorno de pruebas y la elaboración de sus modelos de pruebas, han servido para estimar el tipo de herramientas a utilizar en este trabajo.

El trabajo que presentan Zamek, I. y Zamek, S. [ZAME05] contribuye con las definiciones formales, términos de medición y relaciones del concepto de Jitter, el cual es un parámetro fundamental para lograr la transmisión de información en tiempo real en las comunicaciones de VoIP. Y el trabajo realizado por Yishay Mansour sobre el control de Jitter en redes con QoS [MANS01] se enfoca a garantizar la QoS utilizando su algoritmo propuesto para controlar el jitter, sirvió también para entender cómo se relaciona el retardo de los paquetes con el jitter.

El trabajo [BOUL05] es un análisis del rendimiento de una WLAN 802.11g, donde se mide el rendimiento del nivel de aplicación y el índice de señal-ruido en tres escenarios típicos de interiores. Este trabajo demuestra empíricamente dos hechos ampliamente conocidos de las WLANs. Primeramente que al aumentar la distancia al punto de acceso, el rendimiento disminuye y segundo que al aumentar la potencia, mejora el rendimiento. La medición del rendimiento de una red IEEE 802.11g para relacionarlo con el SNR es una investigación que ya ha sido hecha tanto experimentalmente como teóricamente, sin embargo, este trabajo tiene un alcance mucho mayor en la medición del rendimiento de una red 802.11g al ser mucho más específico el análisis, debido a que se buscan las relaciones del retardo, el jitter y la pérdida de paquetes con el SNR, y no solamente el ancho de banda, el cual no es el único parámetro que determina la QoS de una red. Además de que este trabajo incluye el mismo análisis para una WLAN 802.11b, lográndose una mayor

generalidad entre la relación SNR-QoS. Un ejemplo de aplicación que requiere buena QoS es en voz sobre IP (VoIP), donde la recomendación G.114 de la ITU-T (ITU Sector de Estandarización de Telecomunicaciones) especifica que para una buena calidad de voz no debe darse un retardo mayor de 150 ms. de extremo a extremo, el jitter entre paquetes debe estar por debajo de los 50 ms. para que sea aceptable y la pérdida de paquetes no debe superar el 1% [DAVI01, PERE06]. En las secciones 4.5.1 y 4.5.2 de este trabajo se presenta el análisis de la QoS necesaria para VoIP.

1.6 Metodología de desarrollo.

Primeramente se configuró el ambiente de pruebas. El cual se muestra en la figura 1.6

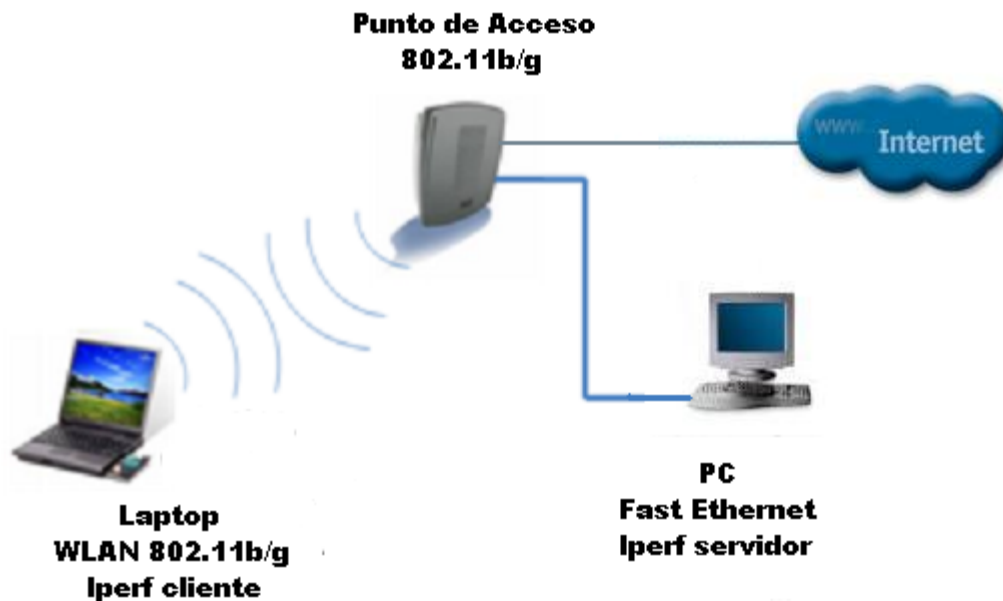


Figura 1.6 Configuración de la red de prueba.

Se instaló en dos computadoras el Sistema Operativo openSUSE Linux, una de ellas contó con una interfaz para 802.11b y alternativamente con una interfaz 802.11g y la otra se conectó a la red mediante un puerto ethernet. Las dos computadoras sincronizaron sus

relojes mediante NTP (Network Time Protocol) para evitar ambigüedades en los reportes estadísticos sobre los tiempos en los experimentos.

En cada caso de pruebas se ejecutó una serie de experimentos por cada nivel de SNR, los paquetes generados por los experimentos fueron almacenados en archivos con formato .pcap el cual es un formato estándar para captura de paquetes.

Una vez finalizados los experimentos junto con la captura de los paquetes, la fase siguiente fue exportar los archivos a formato detallado de XML.

Al tener los archivos generados por ambos nodos en formato XML se procesaron dichos archivos utilizando una aplicación de software (desarrollada exclusivamente para esta tesis) para poder obtener los tres parámetros de rendimiento deseados (retardo, jitter y paquetes perdidos).

Finalmente, se graficó toda la información sobre los dos estándares para su análisis y poder determinar las relaciones entre el SNR y la QoS en ambos estándares. Dentro de las relaciones, se obtuvieron modelos lineales y exponenciales que describen el comportamiento de cada parámetro de rendimiento para ambos estándares de WLANs.

1.7 Descripción Breve de los Capítulos.

Para auxiliar al lector a encontrar rápidamente la información de su interés, además para mostrar un panorama general sobre el contenido de esta tesis denominada “Análisis de relaciones entre QoS y SNR en WLANs 802.11b y 802.11g”, se presenta la siguiente descripción de los capítulos que la integran:

Capítulo 1. Introducción.

En este capítulo se presenta el problema principal que motivó al desarrollo de esta tesis, mostrando un resumen de los antecedentes relacionados con el área de estudio, los

objetivos que se esperan alcanzar, los trabajos relacionados y la metodología a seguir para su desarrollo.

Capítulo 2. Conceptos y Tecnologías Base.

En este capítulo se describen los estándares de la familia 802.11 de la IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), además de aquellos conceptos y tecnologías de las WLANs que son necesarios para poder entender el planteamiento, diseño y desarrollo de esta tesis.

Capítulo 3. Ambiente de Pruebas e Implementación.

Este capítulo contiene una descripción de los elementos de hardware utilizados para constituir el entorno experimental así como de los casos de pruebas y procedimientos que se siguieron para lograr obtener los resultados de esta tesis.

Capítulo 4. Análisis de Resultados.

En este capítulo se detallan las observaciones y modelos matemáticos encontrados en el análisis de los diversos resultados obtenidos en la experimentación.

Capítulo 5. Conclusiones y Trabajos Futuros.

En este capítulo se presentan las conclusiones más importantes que pueden extraerse de esta tesis además para finalizar se describen los posibles trabajos a realizarse en un futuro para darle continuidad a este trabajo.

CAPÍTULO 2

CONCEPTOS Y TECNOLOGÍAS BASE.

En este capítulo se describen a manera de resumen los estándares de la familia 802.11 de la IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), además de aquellos conceptos y tecnologías de las WLANs que son necesarios para poder entender el planteamiento, diseño y desarrollo de esta tesis.

2.1 Introducción a las WLANs.

Una WLAN es un sistema de comunicaciones de datos en red, el cual conecta dos o más computadoras sin usar cables, por lo que las WLANs son consideradas como una tecnología complementaria a las redes cableadas, y de igual forma las WLANs sirven de extensión para las redes cableadas, de modo que la red brinda conexión a dispositivos móviles y portables.

Las redes inalámbricas transmiten la información por medio de ondas de radio o RF (Radio Frecuencias), estas señales son un tipo de radiación electromagnética las cuales son usadas en comunicaciones. Debido a que el medio de transporte de las ondas de radio es el aire, se logra la conectividad inalámbrica, a diferencia de los medios físicos de las LAN convencionales como el par trenzado, coaxial o fibra óptica. La conectividad de las WLANs está limitada a áreas pequeñas, como lo puede ser dentro de un edificio, pequeñas residencias o campus universitarios, esta limitante se debe a la propia naturaleza de las ondas de radio, las cuales tienden a atenuarse conforme aumenta la distancia.

A pesar de que la tecnología WLAN ha tenido auge apenas desde hace algunos años atrás, su origen tiene lugar en el año 1979, con la publicación del trabajo de Fritz R. Gfeller y Urs Bapst [GFEL79]. Sus experimentos fueron llevados a cabo en el laboratorio de investigación de IBM de Zurich.

Para 1990 los productos WLAN usaban DSSS en las bandas ISM (Industriales, Científicas y Médicas) las cuales son un conjunto de frecuencias libres para la mayoría de los países y están entre 902 MHz a 5.925 GHz, también había productos WLAN de radio de 18–19 GHz y WLANs con tecnología infrarroja aparecieron en el mercado. Estos productos fueron los primeros que pudieron ser llamados WLANs porque operaban a altas velocidades. En ese mismo año el comité de IEEE 802.11 fue formado como un grupo de estándares independientes al IEEE 802, para continuar con el trabajo del estándar IEEE 802.4L [PAHL95].

Actualmente las WLANs son cada vez más comunes en los hogares, oficinas, empresas, universidades, y en general están teniendo un crecimiento exponencial, debido a que las capacidades de transferencia de información son cada vez mejores y esto a su vez posibilita la integración de una serie de servicios y aplicaciones que hace algunos años no podían soportar con suficientes garantías de calidad de servicio, servicios como lo son la telefonía sobre Internet o las video conferencias en tiempo real [XIAO05]. Además de que la movilidad que ofrecen a los usuarios al minimizar las conexiones cableadas, siempre es una característica muy atractiva.

Algunos de los beneficios de las redes inalámbricas de área local son los siguientes, [NARV06]:

- Movilidad: posibilita a los usuarios el poder conectarse en cualquier lugar que esté dentro del área de cobertura de la red.
- Fácil despliegue: Para montar una infraestructura de red inalámbrica solamente se requiere un Punto de Acceso.
- Disponibilidad: las redes inalámbricas tienen la posibilidad de permitir el acceso instantáneo a la red a usuarios temporales.
- Productividad: los usuarios pueden tener acceso a la red aunque cambien constantemente de lugar dentro del área de cobertura de la red, esto representa una mayor productividad de los usuarios en su trabajo.

- Escalabilidad: las redes inalámbricas tienen la capacidad de atender a clientes que se agregan a la red repentinamente sin la necesidad de alterar la configuración de la red ni agregar equipo de hardware.
- Bajo costo: al eliminarse las instalaciones de cableado se logra un ahorro económico además de que existen en el mercado Puntos de Acceso y adaptadores utilizados en las computadoras a un precio accesible.
- Flexibilidad: es posible que un usuario pueda conectarse en lugares donde al cable le resultaría inaccesible, superando un mayor número de obstáculos, pudiendo incluso atravesar paredes, lo cual resulta muy útil en zonas donde el cable no se puede utilizar o resulta muy costoso o antiestético.

Y algunas desventajas de las redes inalámbricas de área local son las siguientes:

- Compartición de ancho de banda: El ancho de banda de la red se divide entre la cantidad de usuarios conectados.
- Seguridad: las redes cableadas son más seguras debido a que el cable suele ser un medio exclusivo a diferencia del aire que es un medio compartido, lo que convierte a la información en pública y por lo tanto insegura.
- Alcance: la distancia más grande para este tipo de redes es de unos 100 metros, aunque con el nuevo estándar 802.11n se promete un aumento en el rango de cobertura, esta distancia de 100 metros es suficiente para oficinas o casas pequeñas, pero este alcance se vuelve insuficiente para áreas más grandes, y entonces se necesitan nuevos Puntos de Acceso que funcionen como repetidores para aumentar el rango de cobertura, lo que se traduce en un incremento en el costo de la red.

2.2 Estandarización de Tecnologías WLAN.

Las redes WLAN cumplen con los estándares de las LAN cableadas, esta característica se debe a que las redes LAN cableadas surgieron mucho antes que las inalámbricas y por lo tanto ya se utilizaban por todo el mundo. Con la diferencia de que las WLANs necesitan sus propias normas para las capas más bajas del modelo de referencia OSI (Open System Interconnection), la capa Física y la capa de Enlace de Datos que a su vez se subdivide en LLC que es el Control de Enlace Lógico y la MAC que es el Control de Acceso al Medio, (figura 2.2) y es gracias a las especificaciones de estas capas que se logra tener conexión por medio de ondas de radio. La LLC especifica los mecanismos para el direccionamiento de estaciones conectadas a la red y también controla el intercambio de información entre los usuarios. Por su lado la capa MAC provee el direccionamiento y los mecanismos para lograr el acceso a los canales que posibilitan que los nodos terminales de la red se comuniquen.

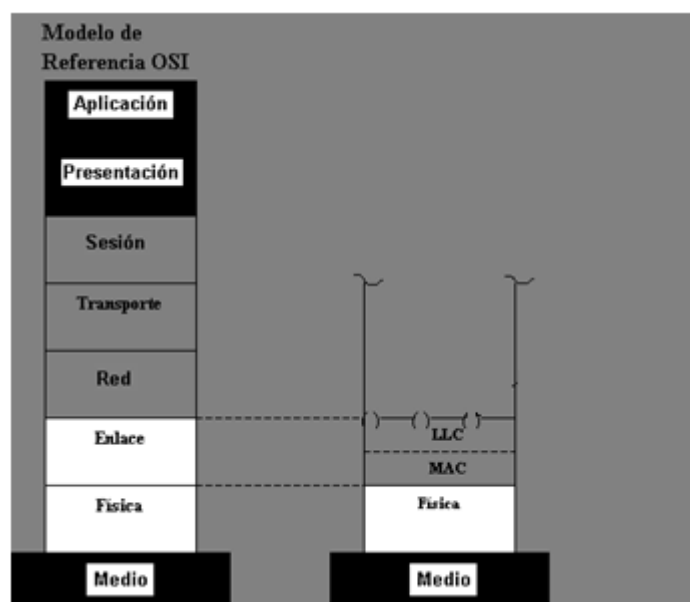


Figura 2.2 Modelo OSI para WLANs.

La IEEE fue la organización encargada de proporcionar el primer estándar para WLAN, el IEEE 802.11 en 1997, a partir de ahí varias organizaciones internacionales han

desarrollado diversos estándares para WLANs, en Europa es el ETSI (European Telecommunications Standards Institute). Pero debido a que este proyecto de tesis se enfoca al análisis de dos estándares de la IEEE, sólo se describirán los estándares de esta organización: IEEE 802.11, IEEE 802.11a, IEEE 802.11b, IEEE 802.11g y IEEE 802.11n.

2.2.1 IEEE 802.11.

Es la versión original del estándar y fue publicada en 1997 para convertirse en el primer estándar para WLAN que soportaba tasas de transferencia de datos de entre 1 y 2Mbps por medio de señales infrarrojas, o técnicas de espectro ensanchado, ya sea FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) que consiste de utilizar una señal portadora que constantemente cambia de frecuencia usando una secuencia pseudoaleatoria establecida por el transmisor y que conocen solamente los receptores autorizados; ó también estaba definido el estándar para usar DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) el cual es un método que utiliza un código de pseudoruido para modular directamente una portadora, para lograr un aumento en el ancho de banda.

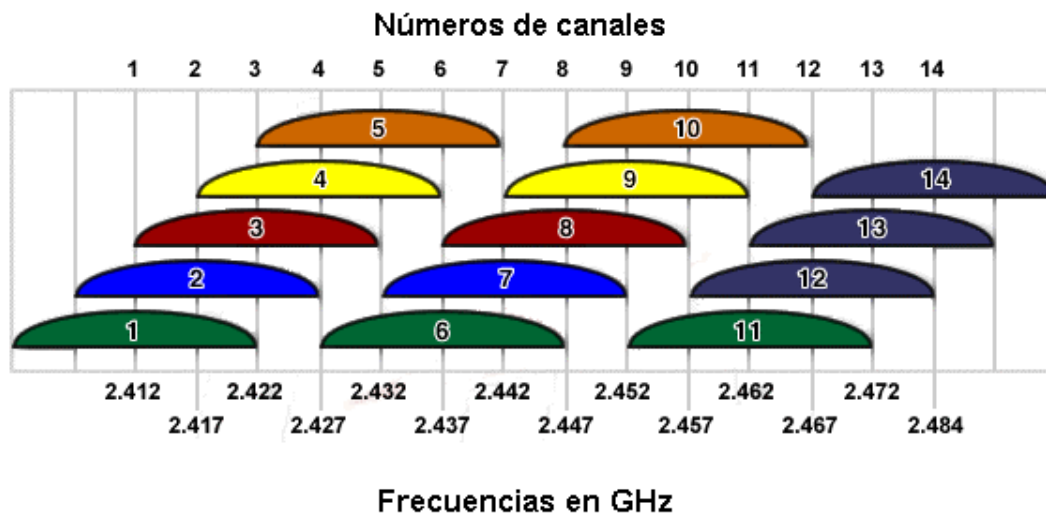
El estándar 802.11 operaba en la banda ISM a 2.4 GHz. El estándar original también definió el mecanismo básico de la capa MAC (Medium Access Control), el protocolo CSMA/CA (carrier-sense multiple-access/collision avoidance) ó acceso múltiple por detección de portadora con evasión de colisiones, el cual es un protocolo de control para permitir múltiples nodos conectados al mismo medio de transmisión y su función prioritaria es la de evitar que dos o más nodos intenten transmitir al mismo tiempo, puesto que se podrían interferir. Uno de los principales problemas de este primer estándar era que no lograba la interoperabilidad debido a que se implementaron diferentes versiones comerciales para el estándar.

2.2.2 IEEE 802.11b.

Este estándar fue aprobado en 1999, logra una velocidad máxima de transferencia teórica de información de 11 Mbps y al igual que su predecesor opera en la banda ISM a

2.4 GHz y utiliza la tecnología DSSS. Para lograr las tasas más altas de transferencia, la de 5.5 Mbps y 11 Mbps se emplea el esquema de modulación CCK (Complementary Code Keying). Los primeros productos que implementaban el estándar IEEE 802.11b aparecieron en el año 2000, el estándar fue tan bien adoptado que en la actualidad existe una gran cantidad de redes que siguen empleándolo.

Los sistemas que implementan el estándar IEEE 802.11b emplean un conjunto de canales de 22 MHz, la cantidad de canales disponibles varía según el lugar, se tienen 11 canales disponibles para América, 13 para Europa y 14 para Japón, una característica a tener en consideración cuando en una red se tiene más de un Punto de Acceso, es el hecho de que los canales consecutivos se traslapan entre sí (figura 2.2.2).



Fig

ura 2.2.2 Canales de Frecuencia de la banda 2.4 GHz.

Los canales recomendados para evitar el traslape son en 1, el 6 y el 11 en América y el 1, 7 y 13 en Europa.

2.2.3 IEEE 802.11a.

En 1999 fue aprobado este estándar, el cual introduce como esquema de modulación a la técnica OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) cuyo principio básico es

el de dividir una señal binaria de alta velocidad a ser transmitida, en varias señales subportadoras de baja tasa de transferencia. En total son 52 subportadoras, de las cuales 48 subportadoras se encargan de llevar los datos actuales y las cuatro portadoras restantes son utilizadas para el proceso de demodulación. Una característica clave del estándar IEEE.11a de capa física es la de proveer ocho modos que utilizan varios esquemas de modulación y tasas de codificación lo que hace posible la conexión adaptativa. BPSK, QPSK, 16-QAM y 64-QAM son los diferentes esquemas de modulación que soporta el estándar [QIAO02]. El sistema OFDM provee a la WLAN la capacidad de comunicación a diferentes tasas de transferencia de información por medio de la adaptabilidad que se logra, obteniendo una tasa teórica máxima de transferencia de 54 Mbps. Los ocho modos se listan en la tabla 2.2.3:

Modo	Modulación	Tasa de codificación	Tasa de datos
1	BPSK	$\frac{1}{2}$	6 Mbps
2	BPSK	$\frac{3}{4}$	9 Mbps
3	QPSK	$\frac{1}{2}$	12 Mbps
4	QPSK	$\frac{3}{4}$	18 Mbps
5	16-QAM	$\frac{1}{2}$	24 Mbps
6	16-QAM	$\frac{3}{4}$	36 Mbps
7	64-QAM	$\frac{2}{3}$	48 Mbps
8	64-QAM	$\frac{3}{4}$	54 Mbps

Tabla 2.2.3 Esquemas de modulación.

Este estándar opera en la banda de 5 GHz, conocida como banda UNII (Unlicensed National Information Infrastructure) lo que le representa una ventaja con los estándares que

operan en la banda ISM de 2.4 GHz, puesto que la banda ISM está sujeta a una mayor cantidad de interferencias debido a la amplia gama de dispositivos inalámbricos que operan sobre esta banda de uso libre.

La posibilidad de lograr velocidades de transferencia de 54 Mbps al menos en la teoría, permitió a las WLANs dar soporte a servicios que requerían un mayor ancho de banda que el que ofrecían los estándares anteriores al IEEE 802.11a, como lo son telefonía y videoconferencias entre otros. Otra ventaja de este estándar es que la banda de frecuencia en la que opera proporciona doce canales que no se traslapan, ocho para red inalámbrica y cuatro para conexiones punto a punto, pero la desventaja de utilizar esta banda de frecuencia es el hecho de tener un menor alcance, ya que la atenuación de las señales de radio es mayor. Al utilizar otra banda de frecuencia diferente a la ISM y diferente esquema de modulación, este estándar no es compatible con el IEEE 802.11b.

2.2.4 IEEE 802.11g.

Este estándar surge en el 2003 y al igual que el estándar 802.11b trabaja en la banda ISM a 2.4 GHz aunque a diferencia de ese estándar, el IEEE 802.11g logra una tasa máxima de transferencia de datos teórica de 54 Mbps, ya que ambos estándares operan en la misma banda de frecuencia estos tienen compatibilidad entre sí, con el inconveniente de que la red operará a velocidades más bajas si se encuentra asociado algún equipo con el estándar IEEE 802.11b. El esquema de modulación que utiliza el estándar es el de OFDM lo que permite mayores tasas de transferencia que el estándar IEEE 802.11b. El éxito inmediato de este estándar se debió precisamente a su compatibilidad con los equipos con implementaciones del estándar IEEE 802.11b que ya se encontraban muy extendidos en el mercado.

Al igual que el estándar 802.11b, este estándar cuenta con 11 canales disponibles en América, 13 en Europa y 14 en Japón. Por lo que los canales recomendados para evitar el traslape son el 1, el 6 y el 11 en América y el 1, el 7 y el 13 en Europa. Los radios de cobertura relativos y velocidades teóricas de este estándar se muestran en la figura 2.2.4 y la tabla 2.2.4. [CAPA05, MART04].

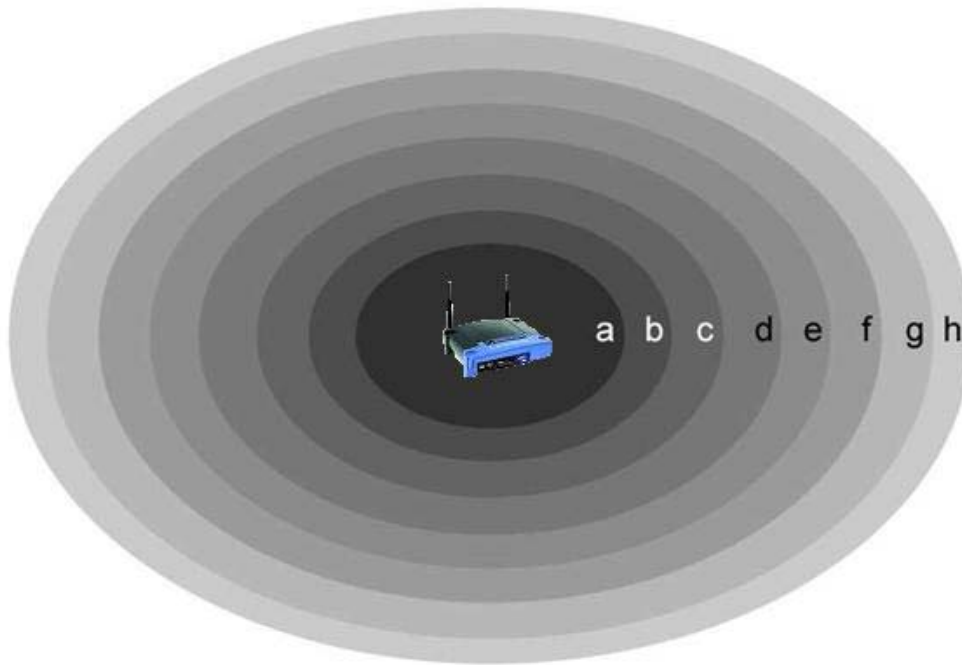


Figura 2.2.4 Distancias de cobertura relativas del estándar 802.11g aproximadas por Cisco Systems

Rango	Velocidad	Distancia
a	54 Mb/s	0-27 m.
b	48 Mb/s	27-29 m.
c	36 Mb/s	29-30 m.
d	24 Mb/s	30-42 m.
e	18 Mb/s	42-54 m.
f	12 Mb/s	54-64 m.
g	9 Mb/s	64-76 m.
h	6 Mb/s	76-91 m.

Tabla 2.2.4 Velocidades teóricas del estándar 802.11g.

2.2.5 IEEE 802.11n.

En la actualidad las nuevas aplicaciones y servicios para redes inalámbricas requieren de un mayor ancho de banda que el que ofrecen los estándares actuales. Un nuevo estándar que podría solucionar esta necesidad se comenzó a desarrollar en el 2004 a cargo del grupo de trabajo de IEEE 802.11 para WLAN que formó el Task Group N (TGn) para desarrollar el nuevo estándar IEEE 802.11n, un estándar que originalmente pretendía velocidades muy superiores a los 54 Mbps que se logran con los estándares IEEE 802.11g y IEEE 802.11a, se hablaba de una velocidad teórica máxima de 600 Mbps o al menos 100 Mbps, el estándar aún no ha sido liberado, sin embargo en Mayo de 2007 se realizó la primera certificación de equipos 802.11n draft 2 y se espera que para el 2008 se apruebe la versión final del estándar.

802.11n emplea la tecnología MIMO (Multiple-Input-Multiple-Output). El uso de esta tecnología mejora las velocidades de transmisión y también el alcance (figura 2.2.5). El éxito de MIMO es que aprovecha lo que había sido uno de los problemas más viejos de las comunicaciones de radio, “la interferencia de multirutas”. Este problema ocurre cuando las señales transmitidas chocan con objetos y crean señales reflejadas que toman múltiples rutas hacia su destino. Con las antenas estándar, las señales llegan fuera de fase y por lo tanto interfieren o cancelan alguna otra. Los sistemas MIMO usan múltiples antenas emisoras y múltiples antenas receptoras. Debido a que MIMO puede codificar datos de diferentes flujos, puede usar canales multiruta como rutas para datos adicionales, en lugar de usarlas como portadoras redundantes de la señal original, lo que logra incrementar el ancho de banda y el alcance [VAUG06]. El sistema receptor se encarga de procesar los múltiples flujos de datos y los ordena adecuadamente. Más aún 802.11n puede enlazar dos o más canales MIMO de 20 MHz para aumentar el ancho de banda. Es por eso que 802.11n pretende un máximo teórico en su velocidad de transferencia de 600 Mbps.

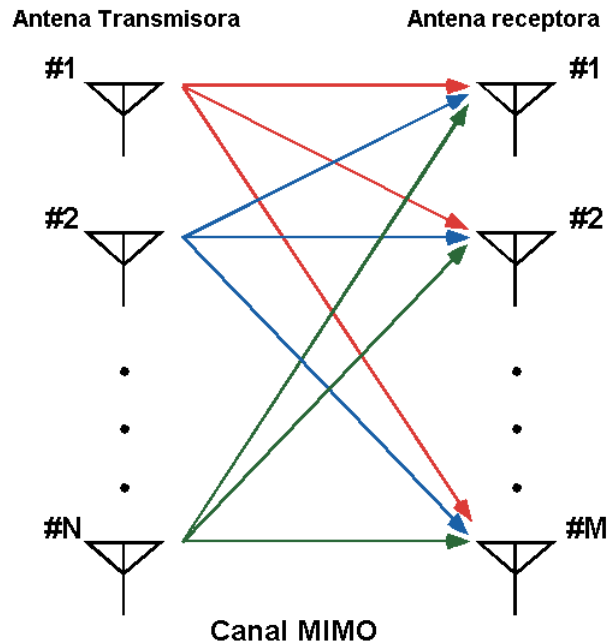


Figura 2.2.5 Esquema de un canal MIMO donde se muestran los arreglos de antenas transmisoras y receptoras.

Generalmente la cantidad de antenas transmisoras es mayor a la cantidad de las antenas receptoras, es decir, $N > M$. Las antenas del arreglo transmisor envían datos independientes a la misma frecuencia a las antenas receptoras y éstas reciben las señales independientes para después combinarlas.

2.3 TCP y su comportamiento en Redes Inalámbricas.

A pesar de que las WLANs son consideradas como una extensión de las redes cableadas y logran interactuar de manera transparente con ellas y son compatibles puesto que buscan adaptarse de la mejor forma al modelo de las redes cableadas y a que utilizan los mismos protocolos de transporte como lo son TCP y UDP, las WLANs presentan algunas desventajas con respecto a las redes cableadas ya que nunca logran alcanzar las capacidades máximas teóricas de rendimiento que marcan los diferentes estándares para WLANs y sufren de diversos retardos en las transmisiones de la información. Estas desventajas de las WLANs con respecto a las redes cableadas son debido en gran medida a que el protocolo de transporte TCP (Protocolo de Control de Transmisión) el cual es el más

frecuentemente utilizado en la capa de transporte en la Internet fue originalmente diseñado para trabajar eficientemente en redes cableadas donde la pérdida de paquetes es muy baja, mientras que en redes inalámbricas el porcentaje de paquetes perdidos es mucho más alto.

TCP es un protocolo orientado a conexión lo que significa que realiza su mayor esfuerzo para garantizar la entrega de un flujo de datos desde una máquina a otra dentro de la red sin pérdida de información. Un mecanismo importante para el correcto funcionamiento de TCP es el control de congestión. Este mecanismo se encarga de no rebasar el cuello de botella que representa el límite del ancho de banda de la red mediante la disminución controlada de la ventana de congestión, la cual determina la cantidad de paquetes que pueden salir en un determinado tiempo. El esquema para evitar la congestión de TCP consiste en que el emisor aplica el esquema de incremento aditivo y decremento multiplicativo (AIMD). Este esquema consiste en que el emisor incrementa su ventana de congestión (cwnd) a lo máximo un segmento cada tiempo de viaje redondo (RTT). Las conexiones TCP utilizan mensajes acknowledgement (ACK) para indicar que los paquetes han sido exitosamente recibidos. Cuando tres o más señales duplicadas de ACK son recibidas por el emisor de manera consecutiva, esto indica que el segmento ha sido perdido. TCP asume la pérdida de paquetes como la consecuencia de la congestión de la red por lo que por consiguiente reducirá su ventana. Este mecanismo para evitar la congestión es eficiente para un ambiente puramente cableado pero no lo es tanto en un ambiente heterogéneo donde la tecnología inalámbrica está presente y esto es porque en un ambiente inalámbrico la congestión no es el único problema causante de la pérdida de paquetes que surge con frecuencia.

En una red inalámbrica la tasa de errores de bits es mucho más alta puesto que el aire es un medio expuesto mayormente a interferencias y obstáculos atenuantes de las señales de radio. A pesar de que la pérdida de paquetes en redes inalámbricas con frecuencia no se debe a congestión en la red, el comportamiento de TCP sigue siendo el mismo y por lo tanto reduce a la mitad el tamaño de la ventana de tránsito de manera innecesaria antes de retransmitir los paquetes perdidos o reinicializar la ventana de congestión. En estos casos que las pérdidas no son provocadas por congestión no es bueno reducir la tasa de envío, porque se degrada el rendimiento del protocolo TCP en ambientes

inalámbricos, puesto que TCP no puede distinguir si el evento de pérdida de paquetes fue debido a una congestión real o a una pérdida aleatoria causada por las características del medio inalámbrico [HSIA04].

Diferentes paradigmas se han utilizado para desarrollar soluciones al problema de TCP para distinguir los motivos de la pérdida de paquetes en ambientes inalámbricos por lo que se prevé su utilización en las redes inalámbricas de las siguientes generaciones para evitar retransmisiones innecesarias que degraden el rendimiento de la red. Un ejemplo de estos paradigmas es el esquema basado en jitter o Jitter TCP (JTCP). Este esquema distingue la congestión por medio del jitter, agrega al mecanismo TCP una estimación de la tasa de jitter para poder distinguir si las pérdidas de paquetes son causadas por congestión o no son causadas por congestión, cuando la tasa de jitter llega a ser muy alta es debido a la saturación del buffer de encolamiento y es cuando se produce la congestión, JTCP detecta los eventos de congestión cuando el valor de la tasa de jitter es significativo y de esta manera se reducen las retransmisiones de paquetes TCP innecesarias [HSIA04].

2.4 Calidad de Servicio QoS.

El término de calidad de servicio para el área de redes computacionales se refiere a la capacidad de una red para proveer mejor servicio a cierto tráfico de red seleccionado sobre varias tecnologías como lo son Ethernet y redes 802.11. Uno de los objetivos principales de la QoS es priorizar cierto tipo de tráfico en la red, incluso asegurar una cantidad de ancho de banda dedicada a algún tipo de servicio. Las garantías de calidad de servicio son importantes si la capacidad de la red es limitada y se necesita mantener un nivel determinado de rendimiento en la transmisión de los flujos de información para mantener un adecuado funcionamiento de servicios que principalmente requieren que su ejecución se de en tiempo real. De manera más específica la QoS es un término utilizado para referirse a garantizar las tasas de transmisión y error en una red computacional.

Algunos de los parámetros elementales que la QoS necesita controlar para poder garantizar la calidad de los servicios de tiempo real o de tráfico interactivo son la latencia y el jitter, además de que es necesario que se mejore la pérdida de paquetes.

A continuación se definirán estos tres parámetros ya que este trabajo de investigación busca analizar el comportamiento del tráfico TCP en términos precisamente de estos parámetros.

2.5 Latencia.

El retardo o latencia, los cuales son sinónimos, es un término que en el área de redes se utiliza para cuantificar el tiempo que tarda un paquete de información desde su emisión en un punto de la red hasta su recepción en otro punto de la misma. Aunque en algunos usos la latencia es medida como latencia de tiempo redondo, es decir, el tiempo que transcurre en el viaje de un paquete desde que es enviado y posteriormente recibido en el destino más el tiempo que tarda en volver desde el destino a la fuente.

Una definición más precisa para el concepto de latencia en redes de conmutación de paquetes es el tiempo desde el comienzo de la transmisión del paquete hasta el comienzo de la recepción del paquete. Es importante hacer esta aclaración puesto que existe otro concepto el cual se refiere al tiempo desde el comienzo de la recepción del paquete hasta el final de la recepción del paquete, y es conocido como retardo de serialización. En este trabajo se utiliza para la experimentación la latencia que cuantifica el tiempo desde el comienzo de la transmisión del paquete hasta el comienzo de su recepción. Algunos de los factores que contribuyen a la latencia de la red son [BLAI06]:

- Propagación: es el tiempo que tarda en viajar un paquete de un lugar a otro a la velocidad de la luz.
- Transmisión: es el retardo que introduce la naturaleza del medio, en el caso de redes inalámbricas, es el aire.
- Ruteadores y otros procesamientos: cada nodo Gateway toma determinado tiempo para examinar y posiblemente modificar el encabezado de un paquete, por ejemplo cambiar el contador de salto en el campo de tiempo de vida del paquete.

- Almacenamiento. Un paquete puede ser sujeto a almacenamiento y retardos de acceso de disco duro de dispositivos intermedios como switches y puentes.

2.6 Jitter.

En electrónica jitter es la desviación de la señal de sus posiciones ideales en el tiempo [ZAME05]. Estas desviaciones pueden ser de diversas características de la señal, como la amplitud, frecuencia o fase de la señal.

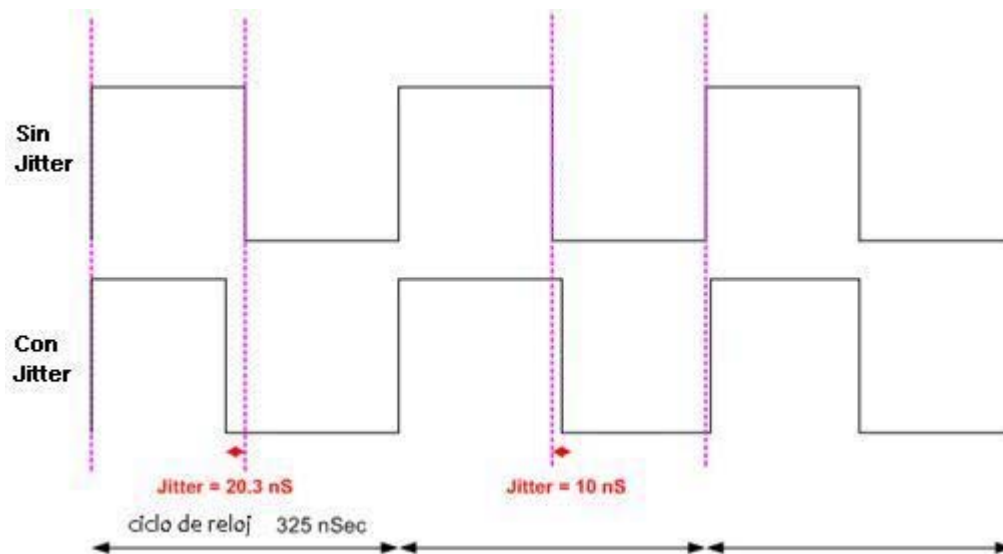


Figura 2.6 Se muestra una comparativa entre una señal ideal sin jitter y una señal con variaciones de 20.3 ns. Y 10 ns. en el tiempo.

Ya en las redes de conmutación de paquetes se entiende al jitter como la variación en el retardo de los paquetes, es decir, la variación de tiempo entre la llegada de los paquetes. Por ejemplo, siendo P_n y P_{n+1} dos paquetes consecutivos con T_n y T_{n+1} como sus tiempos de llegada respectivamente, el jitter entre estos dos paquetes es el siguiente:

$$Jitter = T_{n+1} - T_n .$$

Existe una variedad de términos utilizados para cuantificar de diferentes modos al jitter, dos de estos términos utilizados con frecuencia en el contexto de las redes de

información son el “delay jitter” (retardo de jitter) y el “rate jitter” (tasa de jitter). El delay jitter se refiere a la máxima diferencia en el retardo total de diferentes paquetes, este término asume que no hay pérdida de generalidad debido a que se asume que la señal temporal de referencia es perfectamente periódica, el delay jitter es usual en los contextos de comunicaciones interactivas, como voz, video y teleconferencias, donde las garantías en el delay jitter pueden asegurar el tamaño máximo de buffer en el destino. Por otro lado el rate jitter indica la diferencia en las tasas de entrega de los paquetes en diversos tiempos, es decir, rate jitter mide la diferencia entre el tiempo mínimo y el tiempo máximo de llegada de los paquetes. Rate jitter es una medida útil para muchas aplicaciones de tiempo real, como lo son la transmisión de video sobre una red [MANS98].

2.7 Pérdida de Paquetes.

La pérdida de paquetes de información en una red se produce cuando un paquete no logra ser recibido en su destino y su pérdida puede ser debida a varios factores que incluyen fallas en el enlace, altos niveles de congestión que producen sobrecarga de los buffers de los routers, degradación o atenuación de la señal, paquetes corruptos rechazados en alguna parte de la transferencia o fallas de hardware en la red.

Los efectos que causa el problema de pérdida de paquetes repercuten en el rendimiento de la red, y ocasionan problemas de jitter para aplicaciones como VoIP (Voz sobre IP) y videoconferencias y afectan el rendimiento de las demás aplicaciones de la red.

2.8 Índice de Señal-Ruido SNR.

El SNR es la potencia de la señal dividida entre la potencia del ruido en un punto particular de la transmisión. Debido a que muchas señales pueden tener un rango ampliamente dinámico, el SNR es usualmente expresado en términos de la escala logarítmica de los decibeles (dB). En la literatura el SNR se obtiene con la siguiente fórmula:

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10} \frac{S}{N}$$

Donde:

- S representa la potencia de la señal recibida.
- N representa la potencia del ruido.

La fórmula expresa en decibeles qué tanto la señal es afectada por el ruido. Un alto SNR significa una alta calidad de la señal.

Cada dispositivo de medición del SNR enfrenta diferentes alteraciones que incluyen ruido electrónico, pero también eventos externos que afectan la medición, como lo es el viento, vibraciones, variaciones de temperatura, las variaciones de humedad, etc. dependiendo de la sensibilidad del dispositivo. Es posible reducir el ruido controlando el ambiente.

En el caso de que la potencia de la señal y la potencia del ruido sean iguales $S=N$, el SNR será cero. En esta situación, la señal original no puede ser reconocida porque el nivel del ruido compite severamente con ella. En las comunicaciones digitales, esto puede provocar la reducción de la tasa de transferencia de los datos debido a los errores frecuentes los cuales requerirán que el emisor reenvíe paquetes de datos.

CAPÍTULO 3

AMBIENTE DE PRUEBAS E IMPLEMENTACIÓN.

Este capítulo contiene una descripción de los elementos utilizados para constituir el entorno experimental así como de los procedimientos que se siguieron para lograr obtener una muestra de datos capaz de generar información útil y real para su posterior análisis.

3.1 Hardware.

A continuación se describen los tres dispositivos de hardware utilizados en el entorno experimental:

- Un punto de acceso de la marca 2WIRE, modelo 1701HG Gateway, el cual cuenta con la implementación tanto del estándar IEEE 802.11b así como con la del estándar IEEE 802.11g.
- Una laptop con el sistema operativo linux y la distribución openSUSE 10.2 con un procesador a 1.6GHz y 1.256Gb de memoria ram. Con una interfaz inalámbrica integrada de la marca Broadcom, la cual cuenta con los modos de operación 802.11b/g.
- Una computadora de escritorio con el sistema operativo Linux y la distribución openSUSE 10.3 con un procesador a 3GHz. Y 1GB de memoria RAM. Con una interfaz VIA Rhine II Fast Ethernet.

3.2 Entorno experimental.

El entorno experimental usado durante la experimentación es el que se muestra en la figura 3.2.

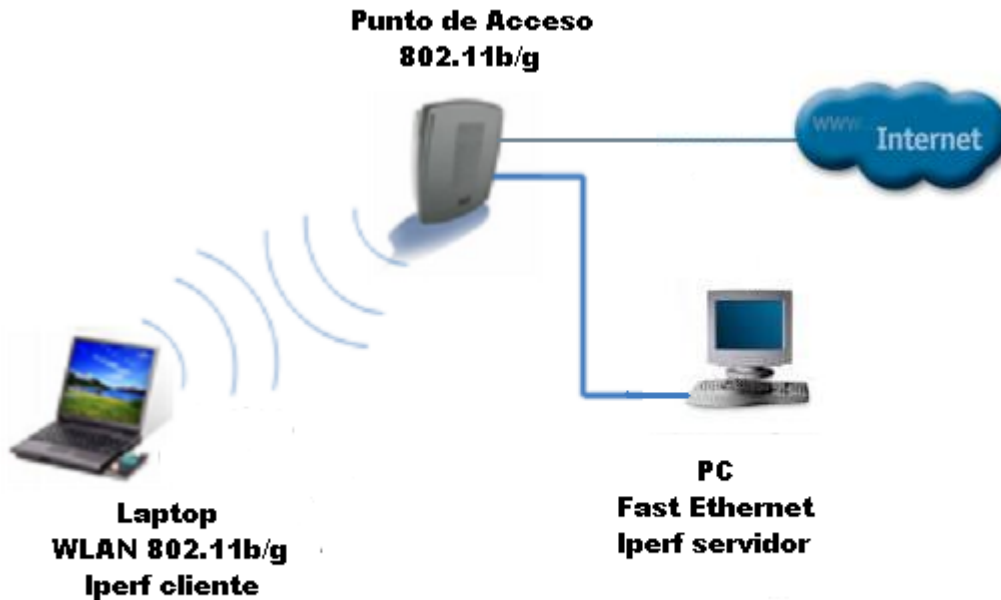


Figura 3.2 Entorno de pruebas.

En la figura anterior se muestra la configuración de la WLAN (red de área local inalámbrica), se observa que ambos nodos, Laptop y PC se enlazan a la red mediante el Punto de Acceso, ambos nodos utilizaron Linux como sistema operativo y en ambos se instaló el generador de tráfico Iperf v.2.0.1, en el nodo PC se ejecutó un proceso Iperf como servidor y en el nodo Laptop se ejecutaron procesos Iperf como clientes durante las pruebas. Este entorno de pruebas tuvo lugar en una pequeña oficina doméstica, donde el nodo Laptop fue colocado a diversas distancias del Punto de Acceso para poder variar su SNR. Para algunas distancias el nodo Laptop fue colocado en el interior de la oficina y para otras distancias fue colocado en el exterior. Debido a que se utilizó la herramienta

NetStumbler para medir el SNR del nodo Laptop, la descripción de los obstáculos que estuvieron interfiriendo entre la ubicación del nodo y el Punto de Acceso es irrelevante.

Este escenario de pruebas es adecuado para lograr los objetivos de este trabajo, ya que el nodo PC al estar conectado al Punto de Acceso mediante su interfaz Fast Ethernet minimiza el retardo de propagación de los paquetes desde el Punto de Acceso hasta el nodo PC. El nodo PC fue conectado al Punto de Acceso a una distancia aproximada de un metro, por lo cual se puede despreciar fácilmente el retardo de propagación del Punto de Acceso al nodo PC, además de que la pérdida de paquetes en este segmento es casi nula debido a la conexión directa mediante el cable. Conectando directamente el nodo PC al Punto de Acceso mediante un puerto Fast Ethernet se desprecia cualquier retardo o pérdida de paquetes ocurrido en este pequeño segmento de la red, por lo que el retardo y la pérdida de paquetes registrados en la experimentación de este trabajo serán los ocurridos por el segmento de conexión inalámbrica entre el nodo Laptop y el Punto de Acceso.

3.3 Casos de pruebas.

Durante las pruebas experimentales se utilizaron dos casos de pruebas:

- caso B.
- caso G.

El caso B utilizó la configuración de red mostrada en la figura 3.2, donde se utilizó el punto de acceso en modo 802.11b. En ambos nodos fue instalado el sniffer tcpdump v.3.8.3, para posteriormente poder ejecutar en ambos nodos de forma simultánea un proceso filtro diseñado para capturar el tráfico de tipo TCP que fue generado durante los experimentos en dirección del nodo Laptop al nodo PC. Para el caso G se utilizó una configuración análoga, donde el modo de funcionamiento del punto de acceso fue el 802.11g.

En cada caso de pruebas se utilizaron nueve niveles de SNR, los niveles de SNR fueron medidos con el nodo Laptop utilizando el software NetStumbler a diferentes

distancias del punto de acceso para establecer los nueve puntos de referencia. Los puntos de referencia fueron elegidos para lograr obtener niveles de SNR con decrementos proporcionales de 10 decibeles aproximadamente, como se muestra en la figura 3.3. Cada serie de experimentos fue ejecutada utilizando al nodo Laptop de forma estática para minimizar las variaciones de SNR en cada nivel.

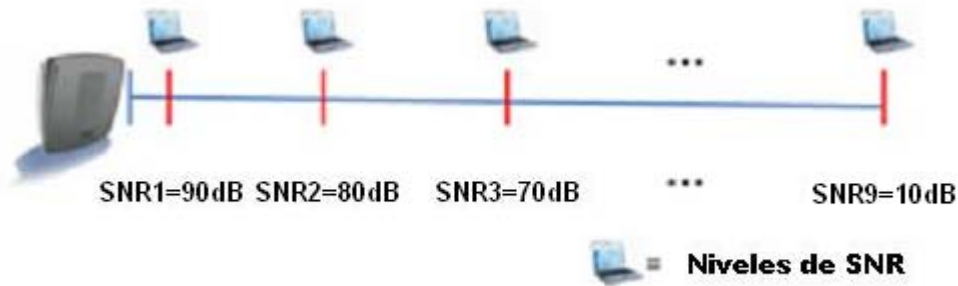


Figura 3.3 Niveles de SNR

Los casos de pruebas fueron diseñados basados en un ambiente diverso, constituido por interiores y exteriores, además de que el ambiente contó con diversos obstáculos como lo son muros, puertas, muebles y diversos objetos de ornamentación de diversos materiales. Debido a que los valores de SNR son variables en el tiempo debido a las condiciones del medio ambiente y además varían para ambos estándares, tanto 802.11b como 802.11g. A continuación se muestran las tablas con los diferentes rangos de SNR obtenidos en los nueve niveles para ambos estándares. Cada nivel presentó diversos valores de SNR durante el tiempo de medición, por lo que en las tablas 3.3.1 y 3.3.2 se muestran los rangos obtenidos de las mediciones de cada nivel de SNR, cada nivel presentó un SNR mínimo y un SNR máximo.

Nivel	Rango	Nivel	Rango
SNR1	[90-99dB]	SNR6	[43-51dB]
SNR2	[80-91dB]	SNR7	[34-41dB]
SNR3	[70-80dB]	SNR8	[27-32dB]
SNR4	[61-71dB]	SNR9	[14-22dB]
SNR5	[51-60dB]		

Tabla 3.3.1 Rangos de niveles de SNR para 802.11b.

Nivel	Rango	Nivel	Rango
SNR1	[90-99dB]	SNR6	[43-51dB]
SNR2	[81-91dB]	SNR7	[31-38dB]
SNR3	[70-80dB]	SNR8	[23-30dB]
SNR4	[61-70dB]	SNR9	[17-19dB]
SNR5	[50-59dB]		

Tabla 3.3.2 Rangos de niveles de SNR para 802.11g.

3.4 Procedimiento experimental.

A continuación se describe el proceso que se llevó a cabo para obtener la información de los retardos, jitter y paquetes perdidos de los datos para ambos casos de prueba.

Una tarea vital para la obtención de los retardos adecuados de los paquetes fue la sincronización de los relojes de ambos nodos con una exactitud de milisegundos, para lograrlo se utilizó NTP (Protocolo de Tiempo de Red), donde el nodo PC solicitaba la hora a un servidor externo mediante el proceso demonio ntpd para que posteriormente el nodo Laptop usando el demonio ntpd solicitara la hora del nodo PC que funjía como servidor local al nodo Laptop.

En cada caso de pruebas, tanto en el caso B como en el caso G fueron ejecutados veinte experimentos por cada uno de los nueve niveles de SNR, es decir, en total 180 experimentos por cada caso de pruebas, cada experimento tuvo una duración de 2 minutos donde los paquetes generados fueron almacenados en archivos con formato pcap el cual es un formato estándar para captura de paquetes.

Una vez finalizados los experimentos junto con la captura de los paquetes, la fase siguiente consistió en importar cada archivo con formato pcap tanto los almacenados por el nodo Laptop como los almacenados por el nodo PC en el sniffer Wireshark v.0.99.5 para posteriormente poderlos exportar con formato detallado de XML.

Al tener los archivos generados por ambos nodos en formato XML detallado la última fase del procedimiento para obtener los tres parámetros de rendimiento deseados (retardo, jitter y paquetes perdidos) fue la de procesar dichos archivos utilizando la aplicación de software desarrollada exclusivamente para este proyecto, esta aplicación fue realizada con el lenguaje de programación Java y requiere de cinco parámetros de entrada:

- Archivo en formato XML detallado generado en el nodo Laptop.
- Archivo en formato XML detallado generado en el nodo PC.
- Nombre del archivo de texto para el archivo de salida que contendrá los datos sobre los retardos de los paquetes procesados.
- Nombre del archivo de texto para el archivo de salida que contendrá los datos sobre los jitters de los paquetes procesados.
- Nombre del archivo de texto para el archivo de salida que contendrá los datos sobre los paquetes perdidos de los paquetes procesados.

La herramienta de software analiza la estructura de los paquetes TCP para poder identificar cada paquete en ambos archivos, tanto en el de paquetes enviados desde el nodo cliente, así como en el de paquetes recibidos en el nodo servidor. Además la herramienta analiza la estructura de TCP para poder calcular de forma correcta los tres parámetros deseados.

La herramienta procesa los paquetes usando esta ecuación de retardo:

$$Retardo = \frac{\sum_{i=0}^n (R_i - S_i)}{n}$$

Donde:

- R_i es el tiempo de recepción del paquete.
- S_i es el tiempo de envío del paquete.
- n es la cantidad de paquetes de la serie.

La herramienta procesa los paquetes usando esta ecuación de jitter:

$$Jitter = \frac{\sum_{i=0}^n (R_i - R_{i-1})}{n}$$

Donde:

- R_i es el tiempo de recepción del paquete actual.
- R_{i-1} es el tiempo de recepción del paquete anterior.
- n es la cantidad de paquetes de la serie.

Además la herramienta de software cuenta las retransmisiones de los paquetes para poder obtener los paquetes perdidos.

Finalmente, obtenidos los archivos de texto con la información de los retardos, jitter y paquetes perdidos de todos los paquetes, se graficó toda la información sobre los dos estándares para su posterior análisis.

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE RESULTADOS.

En este capítulo se detallan las observaciones encontradas del análisis de los diversos resultados obtenidos en la experimentación con respecto al comportamiento de los tres parámetros fundamentales en el desempeño de las WLANs para ambos estándares, 802.11b y 802.11g. Se analizaron las gráficas de retardo, las de jitter y las de paquetes perdidos, y se obtuvieron los modelos matemáticos que mejor se ajustaron al comportamiento de estos parámetros. Así también se analizaron finalmente las proporciones de estos tres parámetros entre ambos estándares, es decir, en que medida disminuyen o aumentan los tres parámetros entre ambos estándares.

Para obtener las funciones que describen el comportamiento de los parámetros de rendimiento (retardo, jitter y porcentaje de paquetes perdidos), se utilizaron regresión lineal y exponencial para encontrar las curvas que mejor se ajustaron a los conjuntos de datos obtenidos en la experimentación de este trabajo, es decir, las curvas con el menor error. Para cada parámetro de rendimiento se evaluaron los cuatro tipos de funciones mostrados en la tabla 4.1.

Lineal	Exponencial 1	Exponencial 2	Potencial
$y = m \cdot x + b$	$y = a \cdot b^x$	$y = a \cdot e^{b \cdot x}$	$y = a \cdot x^b$

Tabla 4.1 Regresiones evaluadas para seleccionar el mejor modelo.

Donde la variable dependiente “y” representó al retardo, jitter o porcentaje de paquetes perdidos según fuera el caso, y la variable independiente “x” representó el valor de SNR en decibeles.

4.1.1 Análisis del Retardo para 802.11b.

Lo que puede observarse de la gráfica de retardos (figura 4.1.1), es que la curva resulta estrictamente creciente lo cual indica que el retardo aumenta conforme el nivel de SNR va disminuyendo. La función que mejor describe el comportamiento del retardo es un modelo lineal de la forma $y = mx + b$, donde la variable dependiente es el retardo y la variable independiente es el SNR. El modelo obtenido es el siguiente:

$$(1) \text{ Retardo} = 2.342791312 * (100 - \text{snr}) + 55.59697433$$

Siendo la variable “snr” el valor de SNR en decibeles para el nodo de medición. A continuación se muestran en la tabla 4.1.1 los valores de las variables “snr” y “Retardo” utilizados para la obtención del modelo lineal (1), así también se muestran en la tabla los errores residuales. Donde el error residual es obtenido de la siguiente manera: $\varepsilon = R_o - R_p$, siendo “ R_o ” el retardo observado de la experimentación y “ R_p ” es el retardo pronosticado por el modelo (1). Para la variable “snr” se consideran los valores medios de cada nivel de SNR.

NIVEL	snr	R_o	R_p	ε
SNR1	94.5 dB	65.349 ms	68.482 ms	-3.133
SNR2				
SNR3	75 dB	125.515 ms	114.17 ms	11.345
SNR4				
SNR5	55.5 dB	163.317 ms	159.85 ms	3.467
SNR6				
SNR7	38 dB	183.867 ms	200.85 ms	-16.983
SNR8				
SNR9	19.5 dB	277.482 ms	244.19 ms	33.292

Tabla 4.1.1 Tabla de valores utilizados en la obtención del modelo (1).

La media de la suma de las magnitudes de los errores fue la siguiente:

$$\frac{\sum_{i=1}^n (R_o - R_p)}{n} = 16.4882597 \text{ ms}$$

Donde “ R_o ” es el retardo observado de la experimentación y “ R_p ” es el retardo pronosticado por el modelo (1).

La pendiente de la recta, la cual es 2.342791312 indica el incremento del retardo por cada aumento de una unidad de SNR.

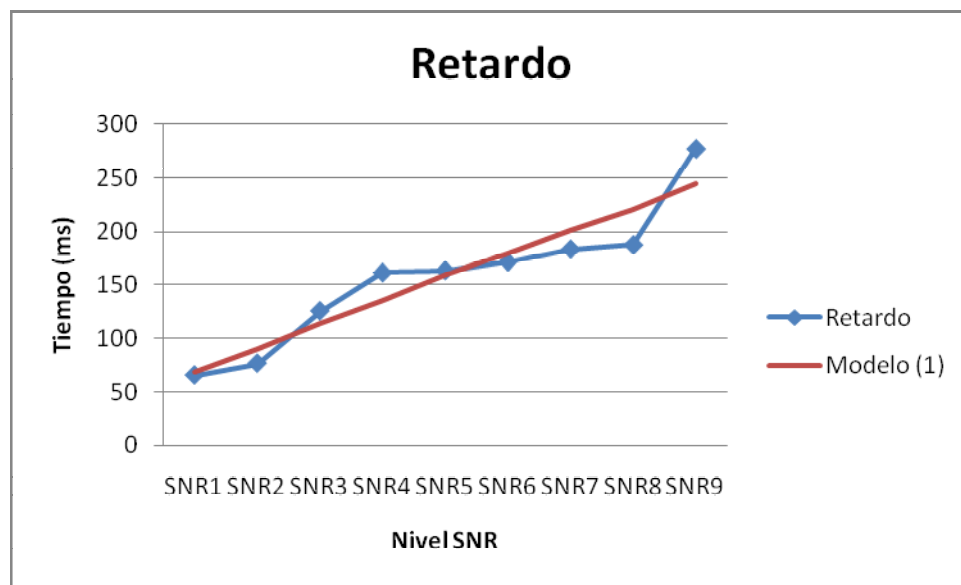


Figura 4.1.1 Gráfica de los retardos del estándar 802.11b.

4.1.2 Análisis del Jitter para 802.11b.

En la figura 4.1.2 la curva de jitter puede ser descrita en dos partes, la primera parte es casi constante a 1.7 ms. hasta llegar al nivel SNR6 [43dB-51dB]. La segunda parte de la curva de jitter, registrada en el rango de [41dB-14dB], (donde 14 dB es el mínimo valor de

SNR registrado en los experimentos) muestra claramente un comportamiento exponencial con un jitter máximo de 1.9 ms.

El modelo que mejor se ajusta a la curva de jitter, es un modelo exponencial de la forma: $y = Ar^x$, donde la variable dependiente es el jitter y la variable independiente es el SNR. El modelo obtenido es el siguiente:

$$(2) \text{ Jitter} = 1.661146001 * 1.000955551^{(100-\text{snr})}$$

Donde la variable “snr” es el valor de SNR en decibeles para el nodo de medición. A continuación se muestran en la tabla 4.1.2 los valores de las variables “snr” y “Jitter” utilizados para la obtención del modelo exponencial (2), así también se muestran en la tabla los errores residuales. Donde el error residual es obtenido de la siguiente manera: $\varepsilon = J_o - J_p$, siendo “ J_o ” el jitter observado de la experimentación y “ J_p ” es el jitter pronosticado por el modelo (2). Para la variable “snr” se consideran los valores medios de cada nivel de SNR.

NIVEL	snr	J_o	J_p	ε
SNR1	94.5 dB	1.697 ms	1.669 ms	0.0275
SNR2				
SNR3	75 dB	1.705 ms	1.701 ms	0.0036
SNR4				
SNR5	55.5 dB	1.707 ms	1.733 ms	-0.0264
SNR6				
SNR7	38 dB	1.754 ms	1.762 ms	-0.0080
SNR8				
SNR9	19.5 dB	1.905 ms	1.794 ms	0.1116

Tabla 4.1.2 Tabla de valores utilizados en la obtención del modelo (2).

La media de la suma de las magnitudes de los errores fue la siguiente:

$$\frac{\sum_{i=1}^n \overline{(J_o - J_p)}}{n} = 0.03488113 \text{ ms}$$

Donde “ J_o ” es el jitter observado de la experimentación y “ J_p ” es el jitter pronosticado por el modelo (2).

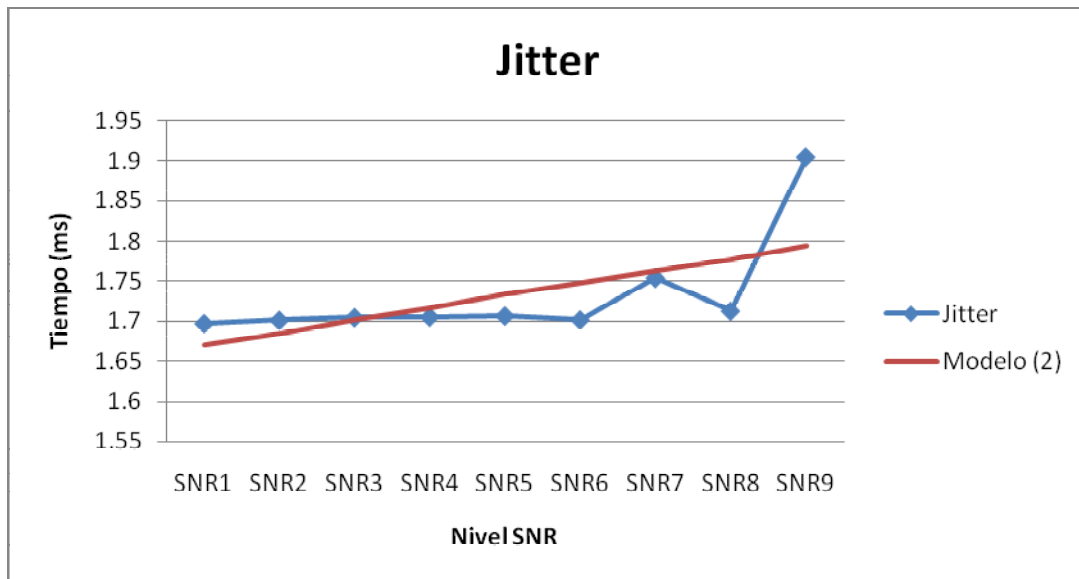


Figura 4.1.2 Gráfica de jitter en el estándar 802.11b.

4.1.3 Análisis de paquetes perdidos para 802.11b.

En general puede observarse que el porcentaje de paquetes perdidos es muy bajo, está por debajo del 1%, aunque si es posible observar que en los niveles más bajos de SNR el porcentaje de paquetes perdidos aumenta de forma exponencial.

Como puede observarse en la figura 4.1.3 La curva de porcentaje de paquetes perdidos puede ser ajustada a un modelo exponencial de la forma: $y = Ar^x$, donde la

variable dependiente es el porcentaje de paquetes perdidos y la variable independiente es el SNR. El modelo es el siguiente:

$$(3) \text{ Porcentaje de Paquetes Perdidos} = .04501629268 * 1.018544777^{(100-snr)}$$

Donde la variable “*snr*” es el valor de SNR en decibeles para el nodo de medición. A continuación se muestran en la tabla 4.1.3 los valores de las variables “*snr*” y “*Porcentaje de Paquetes Perdidos*” utilizados para la obtención del modelo exponencial (3), así también se muestran en la tabla los errores residuales. Donde el error residual es obtenido de la siguiente manera: $\varepsilon = PP_o - PP_p$, siendo “*PP_o*” el porcentaje de paquetes perdidos observado de la experimentación y “*PP_p*” es el porcentaje de paquete perdidos pronosticado por el modelo (3). Para la variable “*snr*” se consideran los valores medios de cada nivel de SNR.

NIVEL	<i>snr</i>	<i>PP_o</i>	<i>PP_p</i>	ε
SNR1	94.5 dB	0.116 %	0.050 %	0.066196
SNR2				
SNR3	75 dB	0.041 %	0.071 %	-0.030264
SNR4				
SNR5	55.5 dB	0.032 %	0.102 %	-0.06997
SNR6				
SNR7	38 dB	0.131 %	0.140 %	-0.00965
SNR8				
SNR9	19.5 dB	0.414 %	0.198 %	0.21641

Tabla 4.1.3 Tabla de valores utilizados en la obtención del modelo (3).

La media de la suma de las magnitudes de los errores fue la siguiente:

$$\frac{\sum_{i=1}^n (PP_o - PP_p)}{n} = 0.07121667 \%$$

Donde “ PP_o ” es el porcentaje de paquetes perdidos observado de la experimentación y “ PP_p ” es el porcentaje de paquetes perdidos pronosticado por el modelo (3).

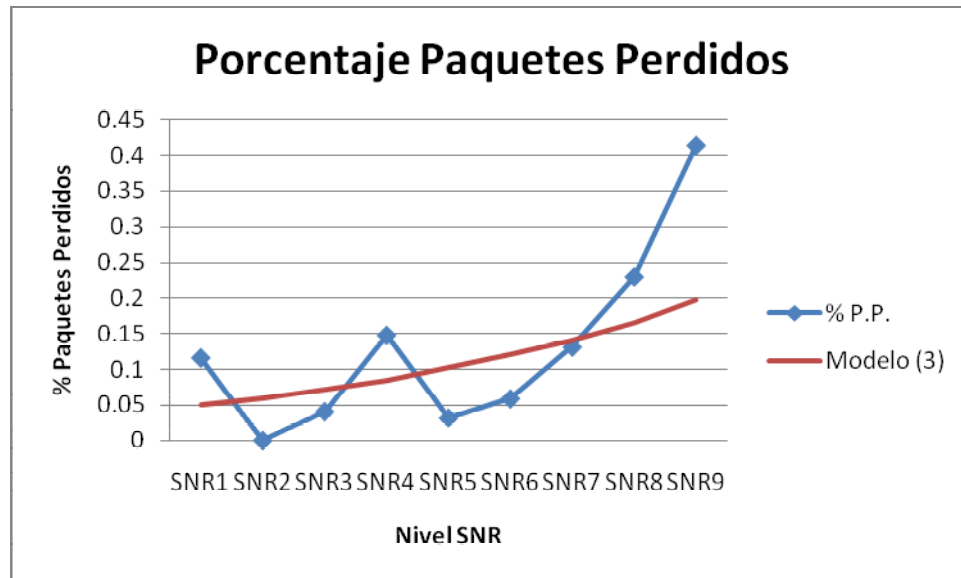


Figura 4.1.3 Porcentaje de paquetes perdidos para el estándar 802.11b.

4.2.1 Análisis de los retardos en el estándar 802.11g.

Puede observarse en la curva de retardo de la figura 4.2.1 que al igual que en caso del estándar 802.11b el retardo tiene un comportamiento estrictamente creciente lo cual muestra que el retardo de los paquetes aumenta conforme el nivel de SNR va disminuyendo.

La función que mejor describe el comportamiento del retardo es un modelo lineal de la forma $y = mx + b$, donde la variable dependiente es el retardo y la variable independiente es el SNR. El modelo obtenido es el siguiente:

$$(4) \text{ Retardo} = 1.5304237919 * (100 - snr) + 69.624476672$$

Siendo la variable “*snr*” el valor de SNR en decibeles para el nodo de medición. A continuación se muestran en la tabla 4.2.1 los valores de las variables “*snr*” y “*Retardo*” utilizados para la obtención del modelo lineal (4), así también se muestran en la tabla los errores residuales. Donde el error residual es obtenido de la siguiente manera: $\varepsilon = R_o - R_p$, siendo “*R_o*” el retardo observado de la experimentación y “*R_p*” es el retardo pronosticado por el modelo (4).

NIVEL	<i>snr</i>	<i>R_o</i>	<i>R_p</i>	ε
SNR1	94.5 dB	91.1921533 ms	78.0418075 ms	13.1503458
SNR2				
SNR3	75 dB	102.054949 ms	107.885071 ms	-5.830122
SNR4				
SNR5	54.5 dB	125.204069 ms	139.258759 ms	-14.05469
SNR6				
SNR7	34.5 dB	168.181056 ms	169.867235 ms	-1.686179
SNR8				
SNR9	18 dB	211.423613 ms	195.119228 ms	16.304385

Tabla 4.2.1 Tabla de valores utilizados en la obtención del modelo (4).

La media de la suma de las magnitudes de los errores fue la siguiente:

$$\frac{\sum_{i=1}^n (R_o - R_p)}{n} = 8.31266898 \text{ ms}$$

Donde “*R_o*” es el retardo observado de la experimentación y “*R_p*” es el retardo pronosticado por el modelo (4).

La pendiente de la recta, la cual es 1.5304237919 indica el incremento del retardo por cada aumento de una unidad de SNR.

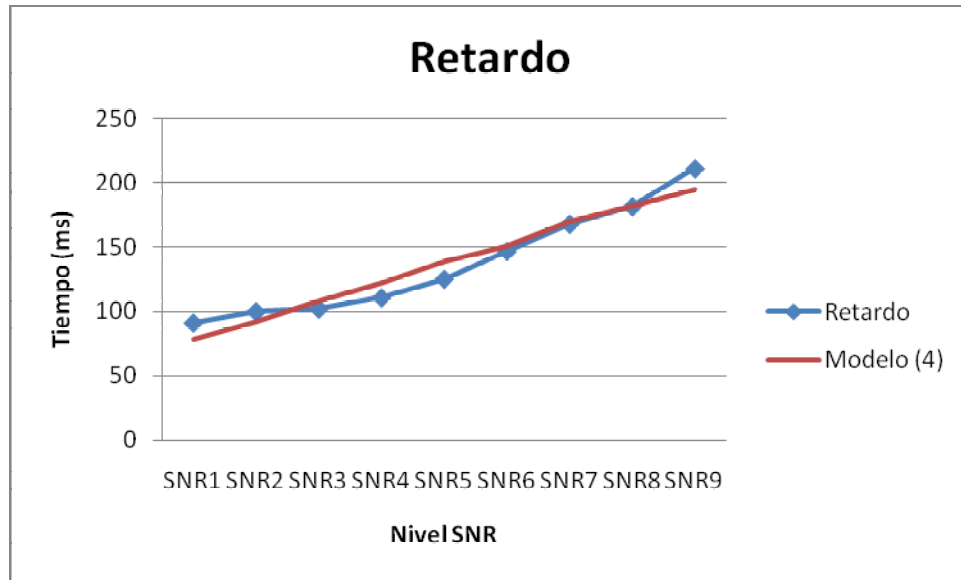


Figura 4.2.1 Gráfica de los retardos del estándar 802.11g.

4.2.2 Análisis del jitter en el estándar 802.11g.

En la figura 4.2.2 la curva de jitter puede ser descrita en dos partes, la primera parte es casi constante entre 0.31 y 0.45 ms. hasta llegar al nivel SNR8 [23dB-30dB]. La segunda parte de la curva de jitter, registrada en el rango de [23dB-17dB], (donde 17 dB es el mínimo valor de SNR registrado en los experimentos) muestra un comportamiento exponencial con un jitter máximo de 2.99 ms.

El modelo que mejor se ajusta a la curva de jitter, es un modelo exponencial: $y = Ar^x$, donde la variable dependiente es el jitter y la variable independiente es el SNR. El modelo obtenido es el siguiente:

$$(5) \text{ Jitter} = 0.26996396 * 1.016587865^{(100-snr)}$$

Donde la variable “snr” es el valor de SNR en decibeles para el nodo de medición. A continuación se muestran en la tabla 4.2.2 los valores de las variables “snr” y “Jitter” utilizados para la obtención del modelo exponencial (5), así también se muestran en la tabla

los errores residuales. Donde el error residual es obtenido de la siguiente manera:

$\varepsilon = J_o - J_p$, siendo “ J_o ” el jitter observado de la experimentación y “ J_p ” es el jitter pronosticado por el modelo (5).

NIVEL	snr	J_o	J_p	ε
SNR1	94.5 dB	0.45082332 ms	0.29553087 ms	0.15529245
SNR2				
SNR3	75 dB	0.31715274 ms	0.40731352 ms	-0.09016078
SNR4				
SNR5	54.5 dB	0.43497298 ms	0.57068927 ms	-0.13571629
SNR6				
SNR7	34.5 dB	0.44320242 ms	0.79304555 ms	-0.34984313
SNR8				
SNR9	18 dB	2.99672006 ms	1.04037362 ms	1.95634644

Tabla 4.2.2 Tabla de valores utilizados en la obtención del modelo (5).

La media de la suma de las magnitudes de los errores fue la siguiente:

$$\frac{\sum_{i=1}^n \overline{(J_o - J_p)}}{n} = 0.35292885 \text{ ms}$$

Donde “ J_o ” es el jitter observado de la experimentación y “ J_p ” es el jitter pronosticado por el modelo (5).

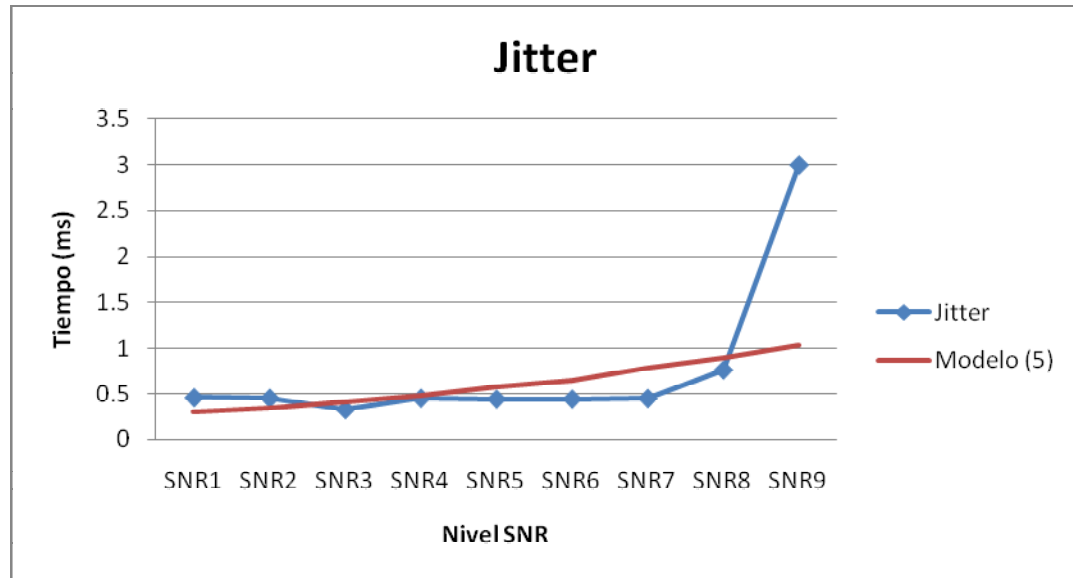


Figura 4.2.2 Gráfica de jitter en el estándar 802.11g.

4.2.3 Análisis del porcentaje de paquetes perdidos en el estándar 802.11g.

El porcentaje de paquetes perdidos al igual que en el caso del estándar 802.11b es muy bajo y se encuentra por debajo del 1%. Lo que si puede observarse es que la pérdida de paquetes aumenta conforme los niveles de SNR disminuyen, y esto es debido a la atenuación de la señal y los diversos obstáculos que interfirieron durante las pruebas experimentales.

Como puede observarse en la figura 4.2.3 La curva de porcentaje de paquetes perdidos puede ser ajustada a un modelo exponencial: $y = Ar^x$, donde la variable dependiente es el porcentaje de paquetes perdidos y la variable independiente es el SNR. El modelo es el siguiente:

$$(6) \text{ Porcentaje de Paquetes Perdidos} = .00420779 * 1.04902768^{(100 - \text{snr})}$$

Donde la variable “ snr ” es el valor de SNR en decibeles para el nodo de medición. A continuación se muestran en la tabla 4.2.3 los valores de las variables “ snr ” y “**Porcentaje de Paquetes Perdidos**” utilizados para la obtención del modelo exponencial (6), así también se muestran en la tabla los errores residuales. Donde el error residual es obtenido de la siguiente manera: $\varepsilon = PP_o - PP_p$, siendo “ PP_o ” el porcentaje de paquetes perdidos observado de la experimentación y “ PP_p ” es el porcentaje de paquete perdidos pronosticado por el modelo (6).

NIVEL	snr	PP_o	PP_p	ε
SNR1	94.5 dB	0.00714286 %	0.00547498 %	0.00166788
SNR2				
SNR3	75 dB	0.01405714 %	0.01392284 %	0.0001343
SNR4				
SNR5	54.5 dB	0.01788571 %	0.03714156 %	-0.01925585
SNR6				
SNR7	34.5 dB	0.07062857 %	0.09673845 %	-0.02610988
SNR8				
SNR9	18 dB	0.26971429 %	0.21310016 %	0.05661413

Tabla 4.1.3 Tabla de valores utilizados en la obtención del modelo (6).

La media de la suma de las magnitudes de los errores fue la siguiente:

$$\frac{\sum_{i=1}^n (PP_o - PP_p)}{n} = 0.02195731 \%$$

Donde “ PP_o ” es el porcentaje de paquetes perdidos observado de la experimentación y “ PP_p ” es el porcentaje de paquetes perdidos pronosticado por el modelo (6).

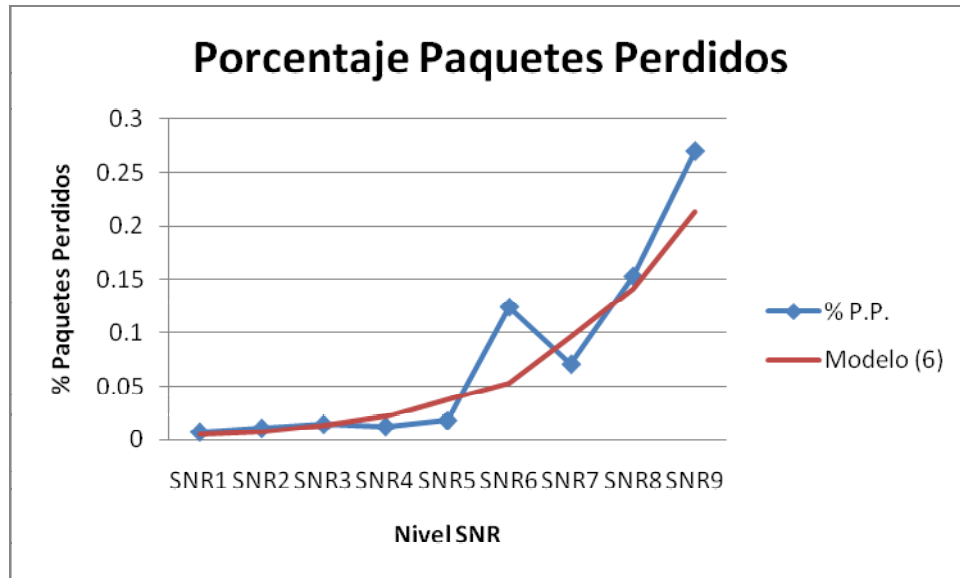


Figura 4.2.3 Porcentaje de paquetes perdidos para el estándar 802.11g.

4.3.1 Análisis comparativo de los retardos entre el estándar 802.11b y el estándar 802.11g.

La figura 4.3.1 muestra ambas curvas de retardos, la del estándar 802.11b y la de 802.11g. Ambas curvas son estrictamente crecientes lo cual indica que independientemente del estándar, ya sea el 802.11b o el 802.11g el retardo aumenta conforme el SNR disminuye. Otra observación que puede hacerse es que el retardo del estándar 802.11b es mayor que el retardo del estándar 802.11g a excepción de los dos primeros niveles de SNR, es decir, sólo en el rango de [99dB-81dB] el retardo del estándar 802.11g fue mayor.

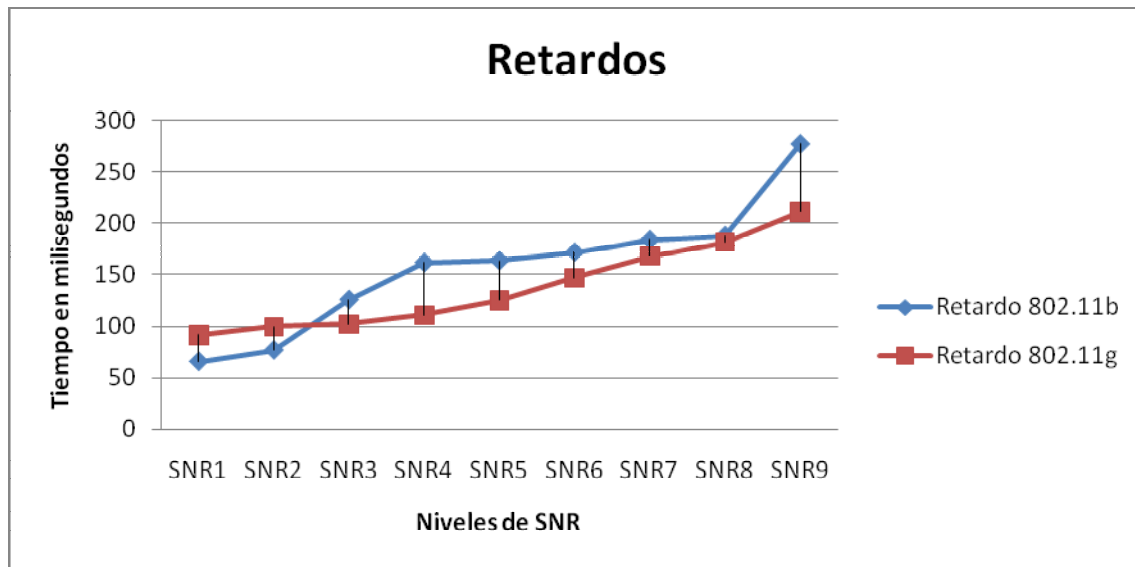


Figura 4.3.1 Comparativa entre ambas curvas de retardos.

4.3.2 Análisis comparativo del jitter entre el estándar 802.11b y el estándar 802.11g.

La figura 4.3.2 muestra que las curvas de jitter tienen un comportamiento exponencial independientemente de si se trata del estándar 802.11b o el estándar 802.11g. Además se observa que el jitter del estándar 802.11b es mayor que el del estándar 802.11g en casi todos los niveles de SNR en el rango de [99dB-19dB], solamente en el rango de [19dB-14dB] el jitter del estándar 802.11g es mayor. Esta información es útil a la hora de seleccionar el estándar inalámbrico para una WLAN que será utilizada para aplicaciones de tiempo real, ya que la calidad de servicio (QoS) de una red depende en gran medida del parámetro jitter. Por lo que si la prioridad en una WLAN es la de los servicios y aplicaciones de tiempo real como lo son videoconferencias y voz sobre IP (VoIP) con una alta calidad de servicio (QoS) entonces el estándar más adecuado es el 802.11g.

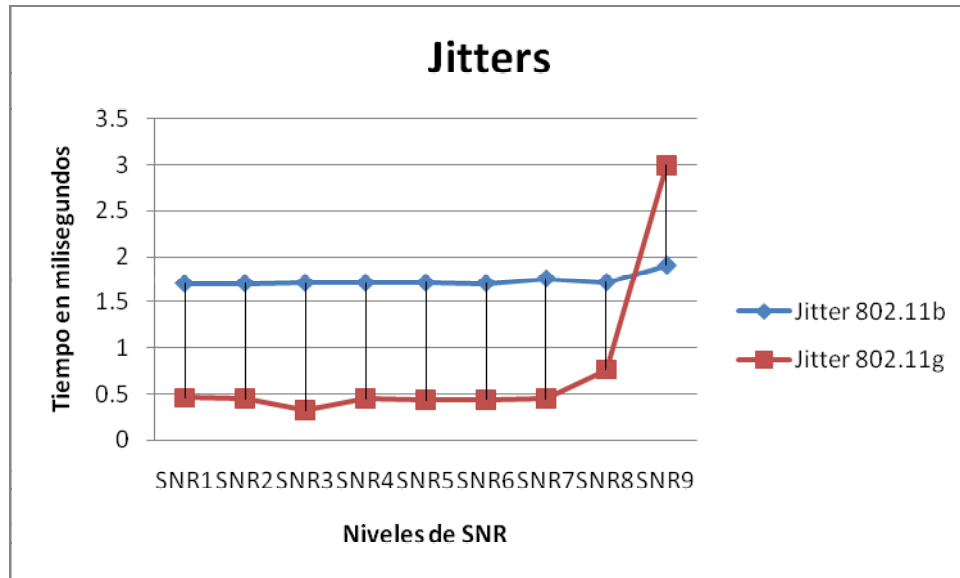


Figura 4.3.2 Comparativa entre ambas curvas de jitter.

4.3.3 Análisis comparativo del porcentaje de paquetes perdidos entre el estándar 802.11b y el estándar 802.11g.

En la figura 4.3.3 puede observarse que ambas curvas de perdida de paquetes son similares, ninguna de las dos llega al 0.45% de pérdida de paquetes, es claro que conforme el nivel de SNR disminuye el porcentaje de paquetes perdidos tiende a aumentar, sin embargo no llegan a haber pérdidas considerables bajo el entorno de red de este trabajo, con pocos usuarios y pocos servicios en ejecución simultáneos que compartan el ancho de banda de la red.

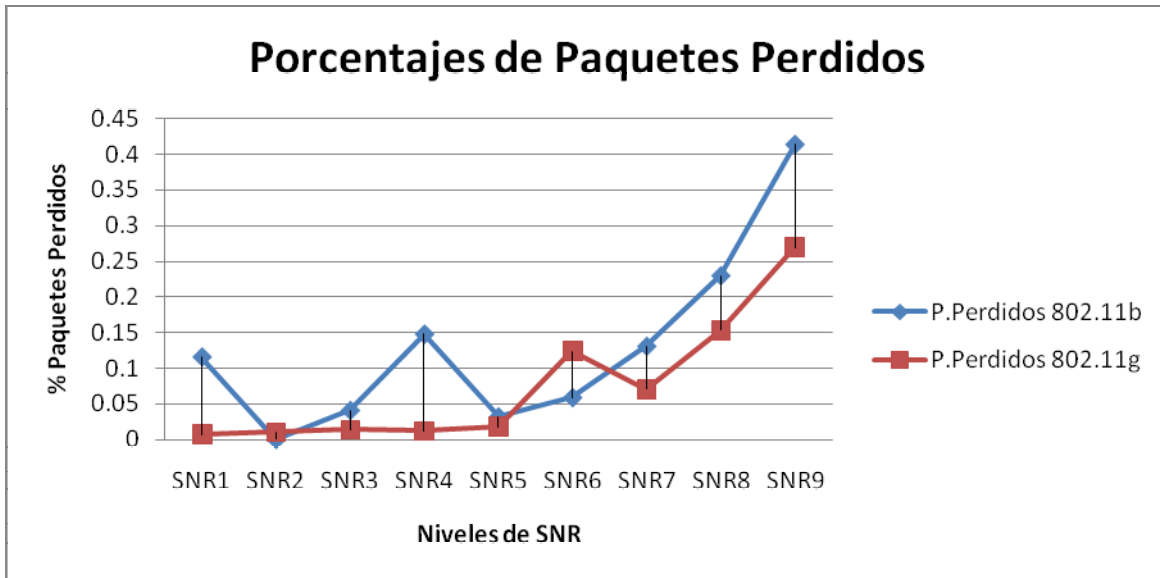


Figura 4.3.3 Comparativa entre ambas curvas de porcentaje de paquetes perdidos.

4.4 Análisis de la proporcionalidad entre los parámetros de rendimiento de ambos estándares.

A continuación se analizarán las proporciones resultantes entre los retardos, los jitter y los porcentajes de paquetes perdidos entre ambos estándares, el 802.11b y el 802.11g. Las razones de proporcionalidad resultantes son las siguientes:

Retardo 802.11b a Retardo 802.11g	1.1202598994
Jitter 802.11b a Jitter 802.11g	3.498008337
%P. Perdidos 802.11b a %P. Perdidos 802.11g	4.287645047

Tabla 4.4 Razones de proporcionalidad entre los parámetros de rendimiento de ambos estándares.

4.4.1 Análisis de la proporción entre los retardos de los paquetes de ambos estándares.

La figura 4.4.1 muestra las razones de proporcionalidad del retardo del estándar 802.11 b al retardo del estándar 802.11g. Puede observarse que sólo los dos primeros niveles de SNR los cuales forman el rango [99dB-81dB] están por debajo de la unidad, esto es debido a que en estos dos niveles de SNR el retardo del estándar 802.11g fue mayor al retardo del estándar 802.11b. la media de estas razones de proporcionalidad resultó en: 1.1202598994. Esto indica que:

“El retardo 802.11b es 1.1202598994 veces mayor al retardo 802.11g, considerando el rango de SNR de 99dB a 14dB”.

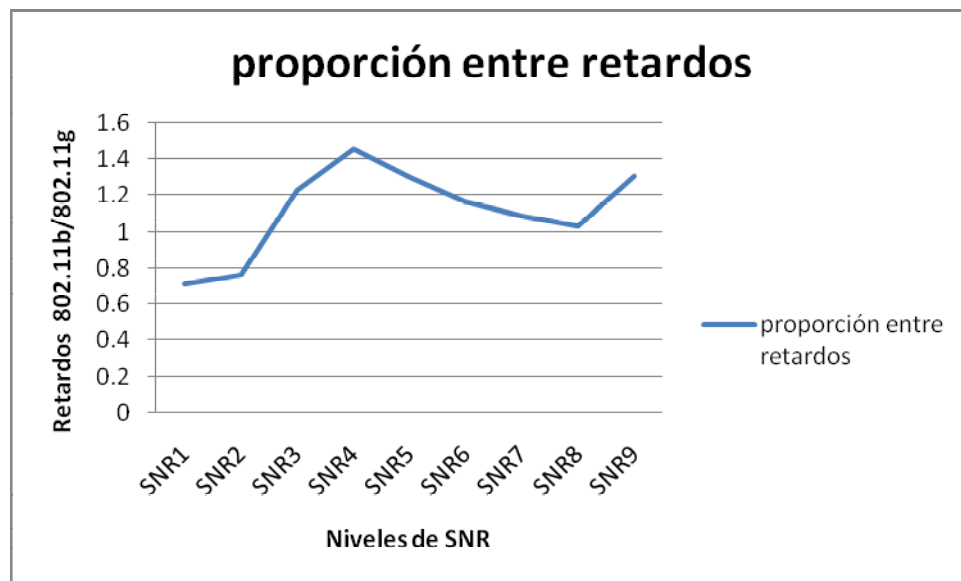


Figura 4.4.1 Razones de proporcionalidad del retardo del estándar 802.11b al retardo del estándar 802.11g.

4.4.2 Análisis de la proporción entre el jitter de los paquetes de ambos estándares.

La figura 4.4.2 muestra las razones de proporcionalidad del jitter del estándar 802.11b al jitter del estándar 802.11g. La curva muestra que únicamente en el último nivel de SNR [19dB-14dB] es menor a la unidad, reflejando que el jitter del estándar 802.11g fue mayor al jitter del estándar 802.11b únicamente en el rango de 19db a 14db de SNR. La media de proporcionalidad resultante es: 3.498008337, lo cual indica que:

“El jitter 802.11b es 3.498008337 veces mayor al jitter 802.11g, considerando el rango de SNR de 99dB a 14dB”.

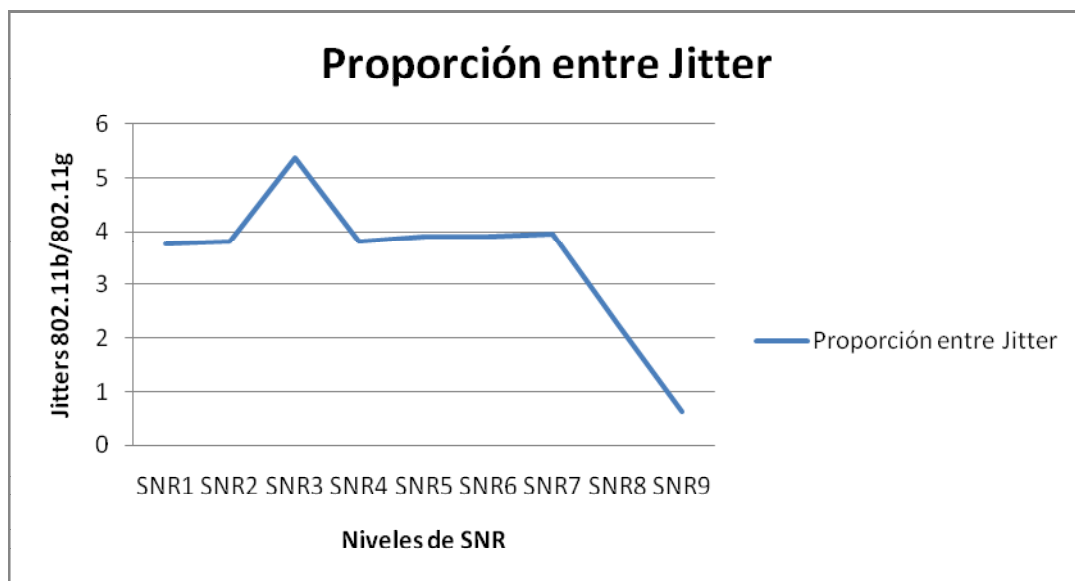


Figura 4.4.2 razones de proporcionalidad del jitter del estándar 802.11b al jitter del estándar 802.11g.

4.4.3 Análisis de la proporción entre el porcentaje de paquetes perdidos en ambos estándares.

La figura 4.4.3 muestra las razones de proporcionalidad del porcentaje de paquetes perdidos del estándar 802.11b al porcentaje de paquetes perdidos del estándar 802.11g. La curva es irregular superando la unidad en algunos niveles de SNR, pero cayendo por debajo de la unidad en los niveles SNR2 y SNR6, La media de proporcionalidad resultante es: 4.287645047, lo cual indica que el porcentaje de paquetes perdidos en el estándar 802.11b es más de cuatro veces mayor al de 802.11g.

“El porcentaje de paquetes perdidos de 802.11b es 4.287645047 veces mayor al porcentaje de paquetes perdidos de 802.11g, considerando el rango de SNR de 99dB a 14dB”.

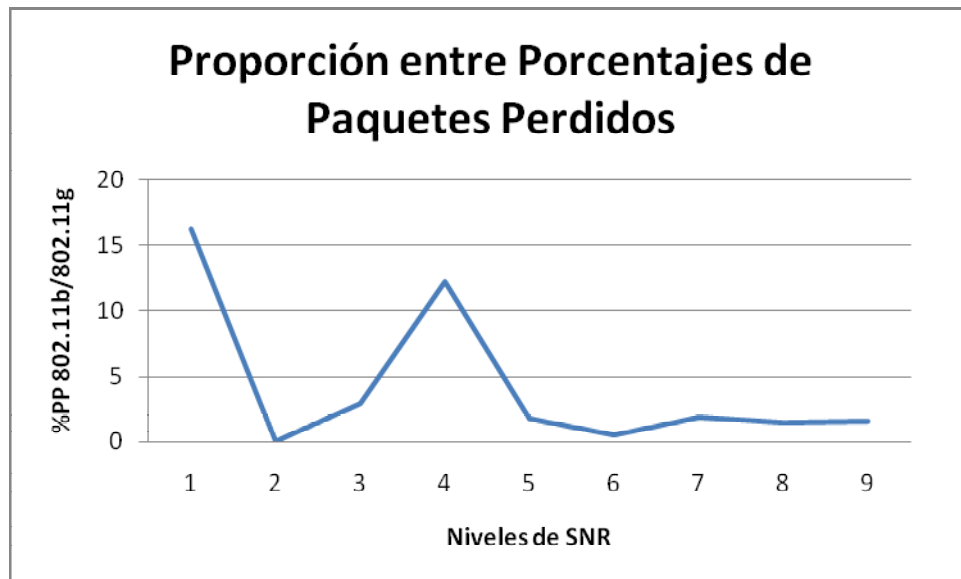


Figura 4.4.3 Razones de proporcionalidad del porcentaje de paquetes perdidos del estándar 802.11b al porcentaje de paquetes perdidos del estándar 802.11g.

4.5 Análisis de QoS necesaria para VoIP.

La recomendación G.114 de la ITU-T (ITU Sector de Estandarización de Telecomunicaciones) especifica que para una buena calidad de voz no debe darse un retardo mayor de 150 ms. de extremo a extremo, así también el jitter entre paquetes debe estar por debajo de los 50 ms. para que sea aceptable y la pérdida de paquetes no debe superar el 1%. [DAVI01, PERE06]. A continuación se estudian los resultados obtenidos en esta tesis para conocer hasta que nivel de SNR se cuenta con una buena QoS para servicios de VoIP.

4.5.1 Jitter y porcentaje de paquetes perdidos necesarios en una buena QoS para VoIP.

La figura 4.3.2 muestra las curvas de jitter tanto para 802.11b como para 802.11g., donde puede observarse que el jitter no rebasa los 3 ms en ningún nivel de SNR. 3 ms. están muy por debajo de los 50 ms. que se tienen como límite para garantizar una buena QoS para VoIP.

En la figura 4.3.3 puede observarse que el porcentaje de paquetes perdidos nunca rebasó el 0.5% de pérdida para ninguno de los dos estándares, por lo que se cubre el requisito de tener menos de 1% de pérdida de paquetes para garantizar una buena QoS para VoIP.

Bajo las condiciones de red que se tienen en este trabajo, es decir, pocos usuarios y pocos servicios en ejecución simultáneos que compartan el ancho de banda de la red, se cumplen los requisitos tanto de Jitter como de porcentaje de paquetes perdidos para una buena QoS en servicios de VoIP, por lo que ahora sólo resta analizar que pasa con los retardos de los paquetes observados en los diferentes niveles de SNR.

En este trabajo fueron realizadas una serie de pruebas con datagramas UDP de longitud 1470 bytes y tamaño de buffer UDP de 108 Kbytes a 25 dB bajo la misma configuración de red utilizada en las pruebas TCP para tener una comparativa entre el jitter y el porcentaje de paquetes perdidos de ambos protocolos de transporte, TCP y UDP. Los resultados de jitter y porcentaje de paquetes perdidos de estas pruebas con UDP se muestran en la tabla 4.5.1:

	Jitter	% Paquetes Perdidos
UDP 802.11b	3.47693388	2.25%
UDP 802.11g	6.24711201	0.144%

Tabla 4.5.1 Medias de jitter y porcentaje de paquetes perdidos con UDP.

Puede observarse de los resultados con el protocolo de transporte UDP a 25 dB, que el estándar 802.11b supera el 1% de pérdida de paquetes, por lo que no puede garantizarse una buena QoS para VoIP dadas las condiciones de red de este trabajo. En cambio con el estándar 802.11g el jitter y el porcentaje de paquetes perdidos son los adecuados para una buena QoS a 25 dB en una red con pocos usuarios y pocas aplicaciones en ejecución que estén compartiendo el ancho de banda de la red.

4.5.2 Retardos con niveles de SNR adecuados para una buena QoS para VoIP.

En la figura 4.5.2 puede observarse que para el estándar 802.11b los primeros tres niveles de SNR tienen retardos menores a 150 ms. es decir, que con menos de 70 dB de SNR no se garantiza una buena QoS para VoIP con este estándar bajo las condiciones de red propuestas en este trabajo, es decir con pocos usuarios y pocas aplicaciones en ejecución simultáneas que compartan el ancho de banda de la red.

En cuanto al estándar 802.11g los primeros seis niveles de SNR presentan retardos menores a los 150 ms., con lo cual no se recomienda contar con menos de 40 dB de SNR para contar con una buena QoS en servicios de VoIP bajo las condiciones de red utilizadas en este trabajo.

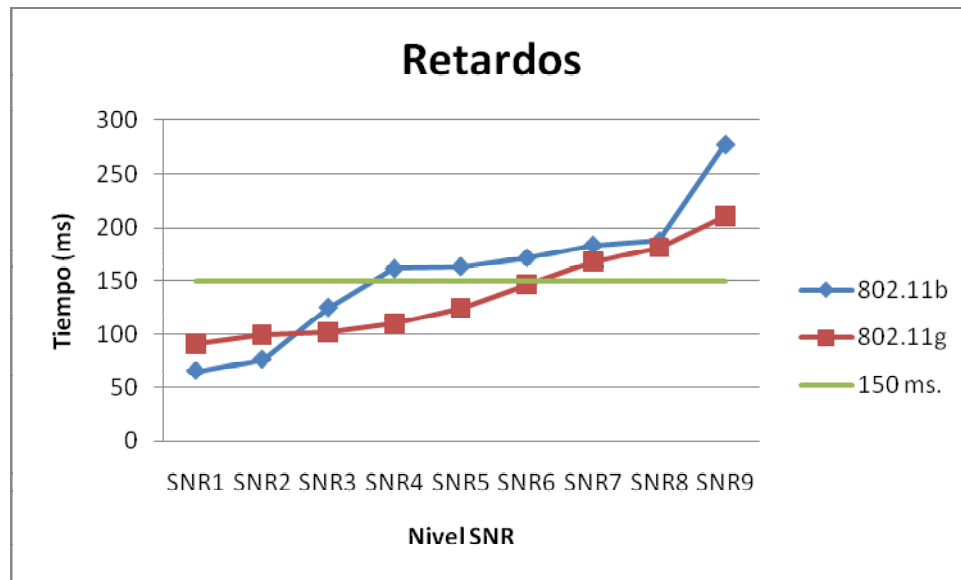


Figura 4.5.2 Niveles de SNR que no superan los 150 ms.

Este trabajo analiza la QoS de una red 802.11b y otra 802.11g mediante transmisiones de paquetes TCP. El protocolo TCP produce retardos mayores a los que produce el protocolo UDP. Los resultados de las pruebas con paquetes UDP a 25 dB se presentan para tener una comparativa más precisa entre los retardos TCP y UDP. Los resultados de los retardos de estas pruebas con UDP se muestran en la siguiente tabla:

Estándar WLAN	Retardos UDP
802.11b	131.009781 ms.
802.11g	130.76351 ms.

Tabla 4.5.2.1 Medias de retardos con UDP.

En la tabla 4.5.2 puede observarse que los retardos fueron menores a 150 ms en ambos estándares. Lo que indica que por lo menos hasta 25 dB se puede garantizar una buena QoS para VoIP utilizando el protocolo UDP bajo las condiciones de red empleadas en este trabajo. Con estos experimentos que usaron el protocolo de transporte UDP se demuestra que con TCP se obtienen retardos mayores a los que se obtienen con UDP.

Finalmente en la tabla 4.5.2.2 se enlistan los resultados sobre la QoS que presentaron los protocolos de transporte estudiados para cada uno de los dos estándares. Considerando una “buena QoS” para VoIP la recomendación G.114 de la ITU-T (ITU Sector de Estandarización de Telecomunicaciones), la cual especifica un retardo máximo de 150 ms., jitter menor a 50 ms. y menos de 1% de pérdida de paquetes.

Protocolo	Estándar	QoS para VoIP
TCP	802.11b	Presentó buena QoS para VoIP con al menos 70 dB de SNR.
TCP	802.11g	Presentó buena QoS para VoIP con al menos 40 dB de SNR.
UDP	802.11b	No presentó buena QoS para VoIP a 25 dB de SNR.
UDP	802.11g	Presentó buena QoS para VoIP a 25 dB de SNR.

Tabla 4.5.2.2 QoS para VoIP utilizando TCP y UDP como protocolos de transporte.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.

En este capítulo se presentan las conclusiones más importantes que pueden extraerse de este trabajo de investigación además para finalizar se describen los posibles trabajos a realizarse en el futuro para darle continuidad a esta tesis.

5.1 Conclusiones.

Esta tesis tenía como finalidad el poder hallar modelos matemáticos que describieran las relaciones entre el índice de señal a ruido (SNR) y el rendimiento tanto de una red 802.11b como también de una red 802.11g en términos de retardo, jitter y pérdida de paquetes TCP. Así también uno de los objetivos era el de hallar las razones de proporcionalidad en el retardo, el jitter y el porcentaje de paquetes perdidos entre ambos estándares. Para poder encontrar estos modelos matemáticos y razones de proporcionalidad se realizó un análisis de cómo el SNR afecta el rendimiento del tráfico TCP en una WLAN 802.11b y en una WLAN 802.11g, las relaciones y proporciones obtenidas en esta tesis se describen a continuación:

- En cuanto a la relación entre el retardo de los paquetes TCP y el SNR en la WLAN 802.11b se obtuvo el modelo lineal:

$$\text{Retardo} = 2.342791312 * (100 - \text{snr}) + 55.59697433$$

Teniendo un incremento de 2.342791312 en el retardo por cada aumento de una unidad de SNR.

- De manera análoga a la WLAN 802.11b, para la WLAN 802.11g se obtuvo un modelo lineal que relaciona el retardo de los paquetes TCP y el SNR:

$$\text{Retardo} = 1.5304237919 * (100 - \text{snr}) + 69.624476672$$

Siendo 1.5304237919 el incremento en el retardo por cada aumento de una unidad de SNR.

- En la WLAN 802.11b el SNR no afectó al jitter a excepción del último nivel de SNR (de 14dB a 22dB), en el rango donde el SNR afectó al jitter se mostró un crecimiento exponencial del jitter conforme el SNR disminuye. El modelo exponencial obtenido que mejor se ajusta al comportamiento del jitter es:

$$\text{Jitter} = 1.661146001 * 1.000955551^{(100-\text{snr})}$$

- En la WLAN 802.11g el SNR no afectó al jitter sino hasta los últimos dos niveles de SNR los cuales abarcan el rango de [23dB-30dB] donde el jitter creció exponencialmente de manera similar al último nivel de SNR en el caso 802.11b. El modelo exponencial obtenido que mejor se ajusta al comportamiento del jitter es:

$$\text{Jitter} = 0.26996396 * 1.016587865^{(100-\text{snr})}$$

- En la WLAN 802.11b el porcentaje de paquetes perdidos es tan pequeño que se puede decir que el SNR afecta muy poco en la pérdida de paquetes. El modelo exponencial obtenido que describe el comportamiento de la pérdida de paquetes es el siguiente:

$$\% \text{ Paquetes Perdidos} = 0.04501629268 * 1.018544777^{(100-\text{snr})}$$

- De igual forma en la WLAN 802.11g la pérdida de paquetes es despreciable por lo que puede afirmarse que el SNR casi no afecta la pérdida de paquetes por lo menos

bajo las condiciones de red utilizadas en este trabajo. El modelo que describe la pérdida de paquetes, es el siguiente modelo exponencial:

$$\% \text{ Paquetes Perdidos} = 0.00420779 * 1.04902768^{(100 - snr)}$$

- Una conclusión que resulta de la comparación de los retardos de ambas WLANs es que el retardo 802.11g solamente es mayor al retardo 802.11b en los dos primeros niveles de SNR, es decir en el rango [99dB-81dB].
- De la comparación entre el jitter de ambas WLANs se concluye que el jitter de 802.11b es mayor al de 802.11g con la única excepción del último nivel de SNR el de [19dB-14dB].
- Para ambas WLANs el porcentaje de pérdida de paquetes es menor a 0.45%. lográndose así superar el requisito de tener menos de 1% de pérdida de paquetes para una buena QoS si se requieren utilizar en la red servicios de VoIP.
- Las proporciones entre retardos, jitter y porcentajes de paquetes perdidos entre ambos estándares obtenidas de las medias de los parámetros con respecto a los nueve niveles de SNR son las mostradas en la tabla 4.4. Las tres razones de proporcionalidad resultantes coinciden en rebasar la unidad lo que indica que los tres parámetros, retardo, jitter y porcentaje de paquetes perdidos son mayores en la WLAN 802.11b.

Relación	Razón
Retardo 802.11b a Retardo 802.11g	1.1202598994
Jitter 802.11b a Jitter 802.11g	3.498008337
%P. Perdidos 802.11b a %PP 802.11g	4.287645047

Tabla 4.4 razones de proporcionalidad entre los parámetros de rendimiento de ambos estándares.

Además se presentan a continuación las conclusiones obtenidas del análisis de la QoS necesaria para VoIP, siguiendo la recomendación G.114 de la ITU-T (ITU Sector de Estandarización de Telecomunicaciones), la cual especifica que para una buena calidad de voz no debe darse un retardo mayor de 150 ms. de extremo a extremo, el jitter entre paquetes debe estar por debajo de los 50 ms. y la pérdida de paquetes no debe superar el 1%. [DAVI01, PERE06]:

- Utilizando el protocolo de transporte TCP y el estándar 802.11b se puede garantizar una buena QoS para VoIP con al menos 70dB de SNR bajo las condiciones de red utilizadas en este trabajo.
- Utilizando el protocolo de transporte TCP y el estándar 802.11g se puede garantizar una buena QoS para VoIP con al menos 40 dB de SNR bajo las condiciones de red utilizadas en este trabajo.
- Utilizando el protocolo de transporte UDP y el estándar 802.11b no se puede garantizar una buena QoS para VoIP con 25 dB de SNR bajo las condiciones de red utilizadas en este trabajo.
- Utilizando el protocolo de transporte UDP y el estándar 802.11g se puede garantizar una buena QoS para VoIP con 25 dB de SNR bajo las condiciones de red utilizadas en este trabajo.

Los modelos matemáticos y proporciones obtenidas pueden servir para que los diseñadores de redes tomen mejores decisiones para lograr una mayor calidad de servicio (QoS) en la red a diseñar, puesto que al contar con funciones matemáticas que pueden predecir los valores aproximados del retardo, el jitter y el porcentaje de paquetes perdidos dado el SNR que presenta un nodo conectado mediante una interfaz inalámbrica 802.11b u 802.11g a la WLAN, el diseñador de la red puede tomar mejores decisiones sobre cuántos Puntos de Acceso asociar a la red dados los requerimientos de QoS y las distancias de colocación de los mismos controlando los valores de SNR. En la actualidad es cada vez

más frecuente que las WLANs integren servicios y aplicaciones de tiempo real como videoconferencias y voz sobre IP (VoIP), para este tipo de aplicaciones y servicios los parámetros analizados en esta tesis están fuertemente relacionados en el rendimiento de la red, de aquí radica la importancia de este trabajo.

5.2 Trabajos Futuros.

A continuación se presenta una descripción de los trabajos que podrían llevarse a cabo para ampliar el conocimiento de las relaciones entre el SNR y los principales parámetros de rendimiento de una WLAN, los cuales son el retardo, el jitter y el porcentaje de paquetes perdidos:

- Implementar el procedimiento propuesto en este trabajo en un ambiente de red con una carga de trabajo real, el cual incluya múltiples usuarios en la red y cargas de trabajo reales en la red y hacer comparaciones con los resultados de este trabajo de investigación.
- Implementar el procedimiento propuesto en este trabajo, inyectando en la red tráfico de aplicaciones de tiempo real como videoconferencias o voz sobre IP (VoIP) para poder analizar como varía la calidad de servicio (QoS) de la WLAN a diferentes niveles de SNR.
- Implementar el procedimiento propuesto en este trabajo en un ambiente de red con una carga mayor en la red para poder determinar los factores que influyen con más peso en la pérdida de paquetes en una WLAN.
- Utilizar la metodología de desarrollo de esta tesis para la realización de un trabajo análogo que analice las relaciones entre QoS y SNR para el estándar de WLAN 802.11n. Además con la metodología de desarrollo de esta tesis se podrá conocer el ancho de banda real de este nuevo estándar, puesto que en redes inalámbricas el

ancho de banda real siempre está muy por debajo del ancho de banda teórico. Actualmente este estándar no ha sido liberado aún, se espera que en este año (2008) pueda liberarse el estándar final ya que solamente se han certificado algunos equipos que cuentan con el segundo borrador de 802.11n (draft 2).

REFERENCIAS

Referencias Bibliográficas.

[GFEL79] Gfeller, F.R.; Bapst, U.; “Wireless in-house data communication via diffuse infrared radiation”; Proceedings of the IEEE Volume 67, Issue 11, Nov. 1979 Page(s):1474 – 1486.

[PAHL95] Pahlavan, K.; Probert, .H.; Chase, M.E.; “Trends in local wireless networks”; Communications Magazine, IEEE Volume 33, Issue 3, March 1995 Page(s):88 – 95.

[QIAO02] Daji Qiao; Sunghyun Choi; Shin, K.G.; “Goodput analysis and link adaptation for IEEE 802.11a wireless LANs”; Mobile Computing, IEEE Transactions on Volume 1, Issue 4, Oct.-Dec. 2002 Page(s):278 – 292.

[VAUG06] Vaughan-Nichols, S.J.; “Will the New Wi-Fi Fly?”; Computer Volume 39, Issue 10, Oct. 2006 Page(s):16 – 18.

[HSIA04] Wu, E.H.-K.; Mei-Zhen Chen; “JTCP: jitter-based TCP for heterogeneous wireless networks”; Selected Areas in Communications, IEEE Journal on Volume 22, Issue 4, May 2004 Page(s):757 – 766.

[MANS98] Mansour, Y.; Patt-Shamir, B.; “Jitter control in QoS networks”; Foundations of Computer Science, 1998. Proceedings.39th Annual Symposium on 8-11 Nov. 1998 Page(s):50 – 59.

[PERE07] Jesus A. Perez, Benoit Donnet, Olivier Bonaventure; “Preliminary Analysis of the TCP Behavior in 802.16 Networks”; 1st WEIRD Workshop on WiMAX, Wireless and Mobility, Coimbra Portugal, Mayo 2007.

[ZAME05] Zamek, I.; Zamek,S.; “Definitions of jitter measurement terms and relationships”; Test Conference, 2005. Proceedings. ITC 2005. IEEE International.

[MANS01] Mansour, Y.; Patt-Shamir, B.; “Jitter control in QoS networks”; Networking, IEEE/ACM Transactions on, Aug. 2001.

[MEIZ04] Wu, E.H.-K.; Mei-Zhen Chen; “Jitter-Based TCP for Heterogeneous Wireless Networks”; IEEE Journal on, Publication Date: May 2004.

[ZHAN05] Ge Zhang; Hillenbrand, M.; Muller, P.; “Facilitating the interoperability among different VoIP protocols with VoIP Web services”; Distributed Frameworks for Multimedia Applications, 2005. DFMA '05. First International Conference on 6-9 Feb. 2005.

[AZIZ04] Aziz, M.K.A.; Nix, A.R.; Fletcher, P.N.; “A study of performance and complexity for IEEE 802.11n MIMO-OFDM GIS solutions”; Communications, 2004 IEEE International Conference on.

[MEDV06] Irina Medvedev; Bjorn A. Bjerke; Rod Walton; John Ketchum; Mark Wallace; Steven Howard; “A Comparison of MIMO Receiver Structures for 802.11N WLAN – Performance and Complexity”; Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2006 IEEE 17th International Symposium on Sept. 2006.

[XIAO05] Yang Xiao; “IEEE 802.11n: enhancements for higher throughput in wireless LANs”; Wireless Communications, IEEE [see also IEEE Personal Communications, Dec. 2005. Volume: 12, Issue: 6 On page(s): 82 – 91.

[XINH06] Lin X. Cai; Xinhua Ling; Xuemin Shen; Jon W. Mark; Hua Long; “Capacity Analysis of Enhanced MAC in IEEE 802.11n”; Communications and Networking in China, 2006. ChinaCom '06. First International Conference on, Oct. 2006.

[CHIP07] Chipec, Victor M. “Simulación de un Algoritmo Heterogéneo”. Master Thesis. ITESM, Campus Cuernavaca. Mexico. February, 2007.

[YUNQ05] Ma, Yunquian; Yu, Yinzhe; Lu, Guor-Huar; Zhang, Zhi-Li.; “Improving Wireless Link Delivery Ratio Classification with Packet SNR”; IEEE International Conference on Electro Information Technology, 2005. IEEE Computer Society. 6 p. USA. May, 2005.

[BRAN06] Branquinho, O. C.; Reggiani, N.; Ferreira, D. M.; “Mitigating 802.11 Anomaly Using SNR to control Backoff Contention Window”; International Conference on Wireless and Mobile Communications, 2006. IEEE Computer Society. pp 55-61. Romania. July, 2006.

[TIAN05] Tianlin, Wang; Refai, H.H.; “Network performance analysis on IEEE 802.11g with different protocols and signal to noise ratio values”; Second IFIP International Conference on Wireless and Optical Communications Networks, 2005, WOCN 2005. pp. 29 – 33. March, 2005.

[BOUL05] Boulmalf M.; El-Sayed, H.; Soufyane A.; “Measured throughput and SNR of IEEE 802.11g in a small enterprise environment”; 2005 IEEE Vehicular Technology Conference, 2005. VTC 2005-Spring. Vol. 2. pp. 1333 – 1337. May-June, 2005.

[CAPA05] “Capacity, Coverage, and Deployment Considerations for IEEE 802.11g”; Cisco Systems. White Paper. USA, 2005.

[DAVI01] Davison, Jonathan; “Fundamentos de Voz sobre IP”; Cisco Press. Madrid, España, 2001.

[PERE06] Perez, J.A.; Zarate, V.; Montes, A.; Garcia, C.; “Quality of Service Analysis of IPSec VPNs for Voice and Video Traffic”; This paper appears in: Telecommunications, 2006. AICT-ICIW '06. International Conference on Internet and Web Applications and Services/Advanced International Conference on Publication Date: 19-25 Feb. 2006 On page(s): 43 – 43.

[NARV06] Narvázquez Díaz L. E.; “Patrón de Diseño de una WLAN para que Soporte Voz sobre IP (VoIP) y Datos”; Tesis de Maestría; ITESM campus Cuernavaca, México; Octubre 2006.

Referencias en el WEB.

[BLAI06] Ed Blair. Latency definition.

http://searchsmb.techtarget.com/sDefinition/0,,sid44_gci212456,00.html

Fecha de consulta: Agosto 2007.

[MART04] Martínez, E. Planeación y Diseño de Redes WLAN. Publicado en la revista Red en Agosto de 20004.

<http://www.eveliux.com/>

Fecha de consulta: Marzo 2008.