

SIMULACIÓN IMPLEMENTACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE ENLACES WIFI PARA LARGAS DISTANCIAS EN ENTORNOS RURALES.

PRESENTADO ANTE:

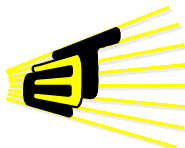
Comité Asesor de Pregrado E³T

Por:

**CÉSAR AUGUSTO BRAVO NIEVES
VÍCTOR ALFONSO COLMENARES LEÓN**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
ELÉCTRICA, ELECTRONICA
Y DE TELECOMUNICACIONES**



Bucaramanga, septiembre de 2010

**SIMULACIÓN IMPLEMENTACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE
ENLACES WIFI PARA LARGAS DISTANCIAS EN ENTORNOS
RURALES.**

CÉSAR AUGUSTO BRAVO NIEVES
TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRÓNICO

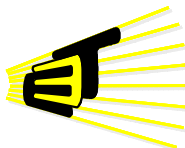
VÍCTOR ALFONSO COLMENARES LEÓN
TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRÓNICO

Director:
MIE. JOSÉ DE JESUS RUGELES

Codirector:
ING. RICARDO DÍAZ SUAREZ



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA
Y DE TELECOMUNICACIONES**



Bucaramanga, septiembre de 2010

DEDICATORIA

A mis padres quienes siempre han sido fuente de amor, comprensión y apoyo, educándome para ser cada día mejor persona. A mi hermano por ser mi mejor amigo y estar siempre a mi lado ayudándome a no desfallecer. A mi compañero de proyecto Víctor, por sacar adelante este reto que se nos presentó en el camino a pesar de todas las dificultades que encontramos. A todos los amigos que permitieron culminar esta etapa de mi vida satisfactoriamente.

César Augusto Bravo Nieves

A Dios, el Director de mi proyecto de vida. A mis padres y hermanos, principales autores de la construcción de mis metas y aspiraciones, por su apoyo, enseñanzas y amor incondicional. A mi amada Claudia Patricia, por ser la compañera ideal en los momentos cruciales de mi carrera, compartiendo tristezas, alegrías, triunfos y decepciones. A mi compañero César, con quien superamos hombro a hombro todos los obstáculos dando lo mejor de sí, no solo en beneficio personal, sino además colectivo.

Víctor Alfonso Colmenares León

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	18
1. MARCO CONCEPTUAL	20
1.1 Redes inalámbricas IEEE.802.11 (WiFi).....	20
1.1.1. 802.11b.	20
1.1.2. 802.11g.....	20
1.2 Capa física del estándar 802.11b/g.	20
1.3. Capa MAC.....	21
1.3.1. Slottime.	23
1.3.2. SIFS.	23
1.3.3. DIFS.	23
1.4. Parámetros MAC que afectan el desempeño del 802.11 en redes de largo alcance..	23
1.4.1. ACKTimeout.....	23
1.4.2. Slottime.	23
1.5 Cálculo del throughput TCP en redes de largo alcance. [20, 29]	25
1.6. Calculo del throughput UDP sobre una red 802.11. [20, 29]	28
1.7. DEFINICIONES.....	29
1.7.1. Throughput [22].....	29
1.7.2. Tiempo de ida y regreso [22].....	29
1.7.3. Jitter [22].	29
1.7.4. RSSI [36].	29
1.8. Técnicas para mejorar el throughput de un enlace bajo el estándar IEEE802.11g [2]	29
1.8.1 Bursting.	29
1.8.2. Fast Frame.	30
1.9. ASPECTOS GENERALES DE RADIOPROPAGACIÓN	31
1.9.1. Ganancia de la Antena	31
1.9.2. Potencia radiada efectiva.....	31
1.9.3. Efectos por la irregularidad del terreno.....	31

1.9.3.1. Reflexión.....	32
1.9.4. Pérdidas de Transmisión.	33
2. ANTECEDENTES Y SITUACIÓN ACTUAL.....	36
3. PROTOTIPOS SISTEMA DE COMUNICACIÓN IEEE 802.11 PUNTO A PUNTO.....	38
3.1. PROTOTIPO 1, Estación (STA).....	39
3.2. PROTOTIPO 2, Punto de Acceso (AP).....	40
3.3. Motherboard o tarjeta principal.	42
3.4. Radios.	43
3.5. Antena.	44
3.6. Pigtail y Protector contra descargas.....	44
4. SELECCIÓN, IINSTALACIÓN Y CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA OPERATIVO Y LA RED PUNTO-A-PUNTO	45
4.1. Instalación del Sistema Operativo Voyage Linux sobre una memoria C.F e instalación del driver de Madwifi estable.	47
4.2. Comandos para la configuración de los nodos de la red Punto a Punto (PtP)	50
4.2.1 Comandos de configuración de la red (Iwconfig y Wlanconfig).	51
4.2.2. Comando de visualización de parámetros de la red (iwlist).....	53
4.2.3. Comando privativo del controlador Madwifi (iwpriv).....	53
4.3. Configuración de los nodos de la red PtP	54
4.4. Modificación de los tiempos de la capa Mac.	55
5. METODOLOGIA DE PRUEBAS	57
5.1. Analizar y seleccionar los parámetros MAC del 802.11 para mejorar las prestaciones en enlaces de largo alcance.	58
5.2. Identificar las características para determinar el desempeño de un enlace punto a punto de área extensa 802.11b/g.	59
5.3. Seleccionar el generador de tráfico, ajustar los parámetros de capa de transporte para realizar las mediciones de las características, determinar el mínimo tiempo de duración de las pruebas.	59
5.3.1. Configuración de iperf para TCP.	60
5.3.2. Configuración de iperf para UDP.	60
5.3.3. Interpretación de los reportes generados.	61

5.4. Seleccionar de los sitios para establecer los enlaces e instalación de los prototipos.	61
5.5. Establecer la interconexión de los sistemas garantizando la estabilidad y nivel óptimo de la señal	61
5.5.1. Pruebas de campo.	61
5.5.2. Pruebas de Laboratorio.....	63
5.6. Reajustar tiempos de la capa MAC.....	64
5.7. Generar los reportes de las pruebas (campo y/o laboratorio) y documentarlas.....	64
6. RESULTADOS	66
6.1. Descripción general y Nomenclatura de los enlaces realizados	66
6.2. CALCULOS DE POTENCIA DE LOS ENLACES Y SIMULACION CON RADIOMOBILE	67
6.2.1. Cálculos de potencia en el receptor.....	67
6.2.2. Simulaciones con Radio Mobile.....	69
6.3. PRUEBAS DE CAMPO	77
6.3.1. Enlace A-B (160 metros).....	77
6.3.2. Enlace B-C. (650 metros).....	82
6.3.3. Enlace D-E. (4.67 kilómetros).	85
6.3.4. Enlace E-F. (10.2 kilómetros).....	89
6.3.4. Enlace B-I (5.01 kilómetros).	93
6.3.5. Enlace G-H.	94
6.4. Pruebas de Laboratorio	95
6.4.1 Enlace B-C.....	96
6.4.2 Enlace D-E.....	98
6.4.3 Enlace E-F.	101
6.4.4 Enlace 20 km.	102
6.4.5 Enlace de 30kms	104
6.4.6 Enlace 40kms.....	104
6.4.7 Enlace 50kms.....	105
6.5. Contraste de los resultados obtenidos con los modelos.....	105
6.5.1. Throughput contra distancia en TCP.....	106
6.5.2. Throughput contra distancia en UDP.....	109

7. CONCLUSIONES	112
RECOMENDACIONES	114
TRABAJOS FUTUROS.....	115
BIBLIOGRAFIA	116

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1. VENTANA DE CONTIENDA	22
FIGURA 1.2. ESQUEMA PARA LA TRANSACCIÓN DE UN PAQUETE DE DATOS PARA EL ESTÁNDAR IEEE802.11g/b	22
FIGURA 1.3. GRAFICA CUANDO EL SLOTTIME ES MAYOR QUE 2 VECES EL TIEMPO DE PROPAGACIÓN.....	24
FIGURA 1.4. GRAFICA CUANDO EL SLOTTIME ES MENOR PERO COMPARABLE A DOS VECES EL TIEMPO DE PROPAGACIÓN	24
FIGURA 1.5. GRAFICA CUANDO EL SLOTTIME ES MENOR QUE DOS VECES EL TIEMPO DE PROPAGACIÓN	24
FIGURA 1.6. THROUGHPUT SATURADO NORMALIZADO PARA 2MBPS VS DISTANCIA	25
FIGURA 1.7. TRANSMISIÓN DE UN PAQUETE TCP	26
FIGURA 1.8. TRANSMISIÓN DE UN PAQUETE UDP	28
FIGURA 1.9. DIFERENCIA ENTRE UNA TRASMISIÓN CON Y SIN BURSTING.	30
FIGURA 1.10. DIFERENCIA ENTRE UNA TRASMISIÓN CON Y SIN FAST FRAME.....	30
FIGURA 3.1. ESQUEMA GENERAL DE LOS DOS PROTOTIPOS PROPUESTOS	38
FIGURA 3.2. DIAGRAMA ESPACIAL Y DE CONEXIONES DEL PROTOTIPO 2, ESTACIÓN (STA)	39
FIGURA 3.4. MONTAJE COMPLETO DEL PROTOTIPO 1 EN UNA PRUEBA DE CAMPO	40
FIGURA 3.6. FOTOGRAFÍA CAJA DEL NIVEL SUPERIOR DEL PROTOTIPO 2 CON MOTHERBOARD	41
FIGURA 3.7. FOTOGRAFÍA CAJA DEL NIVEL INFERIOR DEL PROTOTIPO 2 CON REGULADOR Y BATERÍA.....	41
FIGURA 3.8. SOPORTE METÁLICO PARA EL PANEL Y LA CAJA DEL PROTOTIPO 1	42
FIGURA 4.1. TENDENCIAS DE USO DE LOS PROCESADORES	45
FIGURA 4.2. TENDENCIAS DE USO PARA LOS SISTEMAS OPERATIVOS	46
FIGURA 4.3. TENDENCIA DE USO DE LOS DESARROLLADORES DE SOFTWARE PARA SISTEMAS EMBEBIDOS....	47
FIGURA 5.1. DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA MEDICIÓN DEL TROUGHPUT.....	57
FIGURA 5.2. DIAGRAMA DE FLUJO DE MEDICIÓN DEL NIVEL DE INTENSIDAD RSSI	58
FIGURA 5.3. MEDICIÓN DE POTENCIA USANDO EL WI-SPY.....	63
FIGURA 6.1. MAPA DEL ENLACE B - C.....	71
FIGURA 6.2. VISTA LATERAL DEL ENLACE B-C CON LA HERRAMIENTA RMPATH.....	71
FIGURA 6.3. MAPA DEL ENLACE D - E	72
FIGURA 6.4. VISTA LATERAL DEL ENLACE D-E CON LA HERRAMIENTA RMPATH	72
FIGURA 6.5. MAPA DEL ENLACE E – F.....	73
FIGURA 6.6. VISTA LATERAL DEL ENLACE E-F CON LA HERRAMIENTA RMPATH	73
FIGURA 6.7. MAPA DEL ENLACE G-H (PUNTOS 1-2) Y B-I (PUNTOS 3-4).....	74
FIGURA 6.8. VISTA LATERAL DEL ENLACE B-I CON LA HERRAMIENTA RMPATH.....	74
FIGURA 6.9. VISTA LATERAL DEL ENLACE G-H CON LA HERRAMIENTA RMPATH.....	75
FIGURA 6.10. GRAFICA DEL NIVEL RSSI EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA DEL ENLACE PTP.....	77
FIGURA 6.11. NODO B VISTO DESDE A.	78
FIGURA 6.12. PRUEBA IPERF CON TCP, DURACIÓN: 15 HORAS.	79
FIGURA 6.13. PRUEBA CON 26 MBITS/S DE THROUGHPUT.....	79
FIGURA 6.14. PRUEBA IPERF CON UDP PARA 25 MBITS/S, REPORTE VISTO DESDE EL SERVIDOR.	81
FIGURA 6.15. NODO C VISTO DESDE EL B.	82

FIGURA 6.16. PRUEBA TCP ENTRE B-C PARA EL ESTÁNDAR IEEE802.11G	83
FIGURA 6.17. PRUEBA EN TCP PARA B-C PARA EL ESTÁNDAR IEEE802.11B.....	83
FIGURA 6.18. PRUEBA UDP ENLACE B-C PARA EL ESTÁNDAR IEEE802.11G.....	84
FIGURA 6.19. PRUEBA EN UDP ENTRE B-C PARA EL ESTÁNDAR IEEE802.11B	84
FIGURA 6.20. ENLACE D-E. VISTA DESDE EL PUNTO E	86
FIGURA 6.21. PRUEBA TCP ENTRE D-E PARA EL ESTÁNDAR IEEE802.11G.	86
FIGURA 6.22. PRUEBAS TCP ENTRE D-E, PARA EL ESTÁNDAR IEEE802.11B.....	87
FIGURA 6.23. PRUEBA UDP ENLACE D-E PARA EL ESTÁNDAR IEEE802.11G.....	87
FIGURA 6. 24. PRUEBA EN UDP ENTRE D-E PARA EL ESTÁNDAR IEEE802.11B.....	88
FIGURA 6.25. NODO E VISTO DESDE EL NODO F.....	88
FIGURA 6.26. PRUEBA TCP ENTRE E-F PARA EL ESTÁNDAR IEEE802.11G.....	92
FIGURA 6.27. PRUEBA UDP ENLACE E-F PARA EL ESTÁNDAR IEEE802.11G.	92
FIGURA 6.28. PRUEBAS TCP ENTRE E-F, PARA EL ESTÁNDAR IEEE802.11B.....	93
FIGURA 6.29. PRUEBA EN UDP ENTRE E-F PARA EL ESTÁNDAR IEEE802.11B.....	93
FIGURA 6. 30. OBSTÁCULO EN LA LÍNEA DE VISTA PARA EL ENLACE G-H	95
FIGURA 6.31. RESULTADO EN TCP PARA EL ESTÁNDAR IEEE802.11G EN LABORATORIO. ENLACE B-C.....	96
FIGURA 6.32.. RESULTADO EN UDP PARA EL ESTÁNDAR IEEE802.11G EN LABORATORIO. ENLACE B-C....	97
FIGURA 6.33. RESULTADO EN TCP PARA EL ESTÁNDAR IEEE802.11B EN LABORATORIO. ENLACE B-C.....	98
FIGURA 6.34. RESULTADO EN UDP PARA EL ESTÁNDAR IEEE802.11B EN LABORATORIO. ENLACE B-C.....	98
FIGURA 6.35. RESULTADO EN TCP PARA EL ESTÁNDAR IEEE802.11G EN LABORATORIO. ENLACE D-E	100
FIGURA 6.36. RESULTADO EN UDP PARA EL ESTÁNDAR IEEE802.11G EN LABORATORIO. ENLACE D-E....	100
FIGURA 6. 37. RESULTADO EN TCP PARA EL ESTÁNDAR IEEE802.11B EN LABORATORIO. ENLACE D-E	101
FIGURA 6.38. RESULTADO EN UDP PARA EL ESTÁNDAR IEEE802.11B EN LABORATORIO. ENLACE D-E	101
FIGURA 6.39. GRÁFICA DE DISTANCIA VS RATA DE BITS.	103
FIGURA 6.40. THROUGHPUT EN TCP A 18MBPS EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA	106
FIGURA 6.41. THROUGHPUT EN TCP A 36MBPS EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA	107
FIGURA 6.42. THROUGHPUT EN TCP A 54MBPS EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA	108
FIGURA 6.43. THROUGHPUT EN TCP A 11MBPS EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA	108
FIGURA 6.44. THROUGHPUT EN UDP A 11MBPS EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA	110

LISTA DE TABLAS

TABLA 1.1. VALORES PARA TCP BAJO EL ESTÁNDAR IEEE802.11	27
TABLA 1.2. VALORES PARA UDP BAJO EL ESTÁNDAR IEEE802.11	29
TABLA 3.1. MOTHERBOARDS SELECCIONADAS.	42
TABLA 3.2. RADIO SELECCIONADO.	43
TABLA 4.1. RESUMEN DE LOS COMANDOS DE CONFIGURACIÓN DE LOS SISTEMAS DE COMUNICACIÓN	50
TABLA 6.1. DE LAS COORDENADAS DE LOS NODOS INSTALADAS EN LAS PRUEBAS DE CAMPO	66
TABLA 6.2. RESUMEN DE LOS ENLACES DE CAMPO REALIZADO.....	67
TABLA 6.3. POTENCIA DE TRANSMISIÓN DEL RADIO XR2 Y GANANCIA DE LA ANTENA DE GRILLA	67
TABLA 6.4. ATENUACIÓN DE LOS ELEMENTOS QUE CONFORMAN EL RADIOENLACE	68
TABLA 6.5. TABLA COMPARATIVA DEL DESEMPEÑO DEL ENLACE HACIENDO LOS CÁLCULOS DESCRITOS EN LA SECCIÓN 6.2.1. Y UTILIZANDO EL SOFTWARE RADIO MOBILE	68
TABLA 6.6. CONFIGURACIONES QUE SE VARÍAN EN CADA ENLACE.....	70
TABLA 6.7. RESUMEN DE LA CONFIGURACIÓN DE LOS PARÁMETROS Y LOS SISTEMAS	70
TABLA 6.8. RESUMEN DE LA UBICACIÓN DE LOS ENLACES SIMULADOS.	75
TABLA 6.9. RESUMEN DE LAS PÉRDIDAS Y POTENCIA RECIBIDA EN EL TERMINAL.	76
TABLA 6.10. MÁXIMA RATA DE TRANSFERENCIA PARA LOS RADIOS UBIQUITI XR2.	80
TABLA 6.11. PRUEBAS ENLACE A-B.	81
TABLA 6.12. PRUEBAS B-C	85
TABLA 6.13. PRUEBAS D-E	89
TABLA 6.14. PRUEBAS E-F.....	90
TABLA 6.15. PRUEBAS B-I	94
TABLA 6.16. PRUEBAS G-H.....	94
TABLA 6. 17. PRUEBAS DE LABORATORIO PARA B-C.....	96
TABLA 6.18. PRUEBAS DE LABORATORIO PARA D-E.	99
TABLA 6.19. PRUEBAS DE LABORATORIO PARA E-F.....	102
TABLA 6. 20. PRUEBAS DE LABORATORIO PARA 20KM.....	103
TABLA 6.21. PRUEBAS DE LABORATORIO PARA 30KM.	104
TABLA 6.22. PRUEBAS DE LABORATORIO PARA 40KM.	104
TABLA 6.23. PRUEBAS DE LABORATORIO PARA 50KM.	105

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS DE MEDIDA Y CARACTERIZACIÓN DEL CABLE RG6	115
ANEXO B. GENERALIDADES Y CONFIGURACIÓN DE RADIO MOBILE	125

↓

TITULO: SIMULACIÓN IMPLEMENTACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE ENLACES WIFI PARA LARGAS DISTANCIAS EN ENTORNOS RURALES*

Autores: César Augusto Bravo Nieves, Víctor Alfonso Colmenares León **

Palabras Claves: IEEE802.11b/g, larga distancia, throughput, IPERF, RSSI.

RESUMEN

Este trabajo está enmarcado por el proyecto UIS-Colciencias: *“Diseño, construcción y caracterización de un enlace autónomo de comunicación WiFi para áreas rurales alimentado con energía solar”*. Se busca establecer mediante simulaciones, experimentos de laboratorio y mediciones de campo, el comportamiento de los niveles de señal RSSI y la tasa efectiva de transmisión de datos para enlaces de largo alcance operando en la banda ISM WiFi de 2.4 GHZ. Para cumplir lo anterior se han propuesto dos prototipos de fácil instalación y monitorización de las variables involucradas, incluido el sistema de alimentación fotovoltaico, para realizar enlaces Punto a Punto (PtP). Adicionalmente, se ejecutaron simulaciones con una herramienta de software especializada, llamada Radio Mobile, para predecir de forma aproximada el nivel RSSI a medida que se varía la distancia del enlace. Finalmente, por medio de la utilización de un modelo teórico/experimental del comportamiento de la tasa efectiva de transferencia en función de la distancia para los protocolos TCP y UDP en los estándares 802.11b/g, hacer un contraste con las medias tomadas en campo y laboratorio en el rango de distancias de 0 a 50 Km.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: José de Jesús Rugeles. Codirector: Ricardo Andrés Díaz.

**TITLE: IMPLEMENTATION, SIMULATION AND CHARACTERIZATION OF WIFI LINKS
FOR LONG DISTANCES IN RURAL ENVIRONMENTS***

Authors: César Augusto Bravo Nieves, Víctor Alfonso Colmenares León**

Keywords: IEEE802.11b/g, long distance, throughput, iperf, RSSI.

ABSTRACT

This work is part of UIS-Colciencias project: "Design, construction and characterization of a WiFi communication link for autonomous rural areas powered by solar energy." It pretends to establish through simulations, laboratory experiments and field measurements, the behavior of RSSI signal levels and the effective rate of data transmission for long-range links operating in the ISM band of 2.4 GHz WiFi. That's why two prototypes have been proposed for easy installation and monitoring of all variables involved, including the photovoltaic power system, for point to point links (PtP). In addition, simulations were run with a specialized software tool, called Radio Mobile, to predict an approximate RSSI according to the link distance variation. Finally, through the use of a theoretical / experimental model of the effective transfer rate in terms of distance for TCP and UDP protocols in 802.11b / g, make a contrast with the information taken in field and laboratory in the range of distances of 0-50 km.

* Work Degree.

** Faculty of Physicmecánics. School of Engineering Electric, Electrónica and Telecommunications. Directress: José de Jesús Rugeles. Codirectress: Ricardo Andrés Díaz.

INTRODUCCIÓN

Según datos del banco mundial, en el año 2008 la mayor parte de la población del mundo habitará zonas rurales, solo hasta el 2030 el 60% de la población mundial vivirá en zonas urbanas y en los países en desarrollo solo llegará al 50% en el año 2020. Estas cifras muestran la gran cantidad de personas que habitan las zonas rurales en el mundo, y que las habitaran en los próximos años especialmente en países en desarrollo, en dichas zonas se presentan serios inconvenientes para acceder a la información y para comunicarse. En estas zonas se presentan en muchos casos problemas para acceder a las tecnologías de la información por las dificultades socioeconómicas y territoriales con las que se cuenta, tales como: poco poder adquisitivo, carencia de redes de alimentación eléctrica y alto costo de implementación de dichas tecnología. La interconexión de dichas zonas con la información mundial permitirá reducir los índices de analfabetismo, los problemas de salubridad y el éxodo de la población hacia las áreas urbanas; a su vez aumentar la productividad y competitividad de estas regiones. Por dichas razones el establecimiento de conectividad para estas zonas se ha convertido en una necesidad y una prioridad para muchos países y empresas en el mundo.

La tecnología WiFi es la que cumple de manera adecuada los requerimientos planteados inicialmente, este protocolo se usa en bandas ISM (Industrial Scientific and Medical) que no requieren licencia, tiene una alta velocidad de transferencia permitiendo brindar suficientes servicios a los usuarios y además de tener bajo consumo de potencia.

El proyecto buscó crear este tipo de enlaces tomando datos de intensidad de campo (RSSI) y de la tasa efectiva de datos para enlaces de largo alcance que operan en la banda de frecuencia ISM WiFi de 2.4 GHz, estos enlaces arrojaron un documento que muestra las pruebas realizadas mediante simuladores con Radio Mobile (herramienta de uso libre para observar el funcionamiento de un radio enlace), pruebas en laboratorio y pruebas en campo. Esta documentación permitirá dar soporte al proyecto *“Diseño, construcción y caracterización de un enlace autónomo de comunicación WiFi para áreas rurales alimentado con energía solar”*, el cual está enmarcado dentro de una investigación de Colciencias.

El presente trabajo está estructurado de la siguiente manera: el capítulo 1 contiene el marco conceptual con la información teórica más relevante para entender y respaldar los resultados de este documento; en el capítulo 2 se consignan los antecedentes encontrados en la literatura sobre enlaces WiFi de largo alcance para zonas rurales, estos antecedentes son estudios realizados por grupos de investigación de varias universidades del mundo entero; en el capítulo 3 se consigna una descripción de los prototipos WiFi usados para la realización de los enlaces, se describe detalladamente los nodos Access Point y Estación junto con los elementos que constituyen cada uno de ellos (antenas, motherboards, radios y pigtails); el capítulo 4 corresponde a la selección del sistema operativo instalado en las

motherboards, junto con la configuración del mismo y de la red punto a punto realizada, presenta también un resumen de los comandos utilizados para establecer los enlaces inalámbricos; el capítulo 5 contiene la metodología de pruebas aplicada a las pruebas de campo y de laboratorio realizadas durante el proyecto, además, en este capítulo se explica la manera en que se debe usar la herramienta generadora de tráfico seleccionada; el capítulo 6 presenta los cálculos teóricos del balance de potencias en contraste con las simulaciones de Radio Mobile, adicionalmente, los aspectos mas importantes de las pruebas de campo y laboratorio, siendo el producto de final de este capítulo las gráficas de nivel de intensidad de campo (RSSI) en función de la distancia del enlace y las gráficas de tasa de transferencia efectiva (throughput) en TCP y UDP contra la distancia del enlace. Finalmente, se compilan las conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros.

1. MARCO CONCEPTUAL

1.1 Redes inalámbricas IEEE.802.11 (WiFi) [8].

El estándar IEEE802.11 es un protocolo de comunicación inalámbrica diseñado para redes de área local, después de la publicación del estándar en 1997 se han realizado respectivas mejoras (802.11a, 802.11b, 802.11g, 802.11e, 802.11n). Este estándar opera en las bandas ISM (Industrial, Scientific and Medical) por lo cual su uso no requiere algún tipo de licencia.

1.1.1. 802.11b. [11] Es el más popular en cuanto a que la mayor parte de la tecnología está implementada para este protocolo. Usa una modulación llamada Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) en una porción de la banda ISM entre 2.412 y 2.484 GHz. La tasa teórica de transmisión es de 11 Mbps con una real de 5 Mbps aproximadamente.

1.1.2. 802.11g. [11]. Es un protocolo reciente que utiliza el mismo rango de banda de la 802.11b, pero la modulación se hace con OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). La tasa de transmisión teórica es de 54 Mbps con una usabilidad real de 25 Mbps. También es compatible con el protocolo de transmisión de 802.11b.

Existen otros protocolos más modernos como por ejemplo 802.11n, el cual se utiliza para sistemas tipo MIMO (Multiple Input/ Multiple Output), en este sistema se tienen múltiples canales independientes, cada una con su propia antena y la respectiva configuración de los receptores. Por otro lado, el protocolo 802.11e [13] pretende mantener la compatibilidad con 802.11b/g, pero adicional a esto soporta calidad de servicio para aplicaciones multimedia y voz sobre IP (QoS).

1.2 Capa física del estándar 802.11b/g. [11]

La capa física del estándar 802.11 comprende básicamente la modulación implementada y la frecuencia usada por cada protocolo, como se explico en la sección anterior las frecuencias usadas tanto para el estándar IEEE802.11b y el IEEE802.11g están entre 2.412 y 2.462 GHz separadas en 11 canales con una diferencia de 5 MHz cada una, dejando como diferencia la modulación usada por cada una de ellos.

El protocolo IEEE802.11b usa una modulación llamada Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) la cual consiste en aumentar el ancho de banda transmitido al ensanchar la señal enviando un pseudocódigo (secuencia de bits aleatoria) junto con cada bit transmitido, con el fin de minimizar el ruido y las interferencias.

El protocolo IEEE802.11g por el contrario usa OFDM consiste en un transmisor que envía portadoras dividiendo el canal en varios subcanales ortogonales, esta modulación usa de una manera más eficiente el espectro, permitiendo mayores tasas de transmisión que el espectro ensanchado.

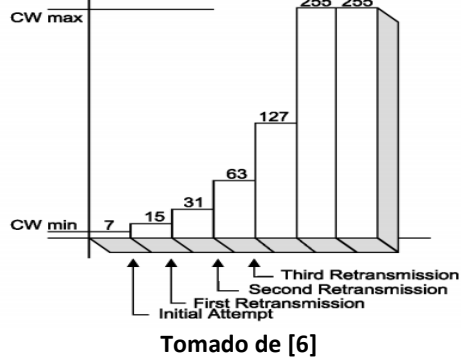
1.3. Capa MAC. [6]

La capa Medium Access protocol (MAC) de los estándares IEEE 802.11b/g definen dos modos para su funcionamiento, el más implementado sobre los radios comerciales es el distribuido (función de coordinación distribuida DCF) el cual utiliza el protocolo CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access With Collision Avoidance) para coordinar la forma como varias estaciones comparten el acceso al medio, el otro modo es centralizado o coordinado (función de coordinación puntual PCF) donde el acceso al medio se ofrece libre de colisiones, su implementación es escasa en radios comerciales por lo tanto no será analizado.

EL DCF tiene dos modos de acceder al medio uno de ellos es el básico (2 way handshaking) el otro es Request to send RTS/CTS (4 way handshaking) el cual se implementa para mejorar la eficiencia de la red cuando existen nodos ocultos.

Cuando se utiliza DCF básico la estación transmisora antes de inicializar una transmisión invoca al mecanismo carrier sense (CS) para determinar si hay otra estación transmitiendo, si encuentra el canal libre por un intervalo de tiempo que excede un espacio interframe distribuido DIFS cuando el último frame detectado en el medio fue recibido de forma correcta o un tiempo Interframe espacio distribuido EIFS si el último frame detectado en el medio fue recibido en forma incorrecta, después inicializa un intervalo de tiempo backoff exponencial aleatorio el cual se encuentra ranurado, estas ranuras se van decrementando mientras la estación transmisora detecta el canal libre, cuando llega el contador de la ranuras a cero la estación transmite (la transmisión se realiza al inicializar la ranura del tiempo cero), si la estación llega a encontrar el canal ocupado el contador se frena y vuelve a esperar DIFS durante el canal se debe encontrar libre para continuar decrementandose, el tiempo backoff aleatorio se selecciona a partir de un valor entre $(0, C_w)$ donde C_w se llama la ventana de contienda cuyo valor depende del número de transmisiones fallidas al enviar un paquete, en el primer intento en que la estación desea transmitir la C_w toma el valor de C_{wmin} llamado la ventana de contención mínima, cada vez que se realiza una transmisión y está no es exitosa el valor de C_w se dobla, hasta alcanzar un máximo valor C_{wmax} , para lo cual se tiene $C_w = 2^i C_{wmin}$ donde i se refiere a la i -ésima retransmisión, esto se puede apreciar en la figura 1.1.

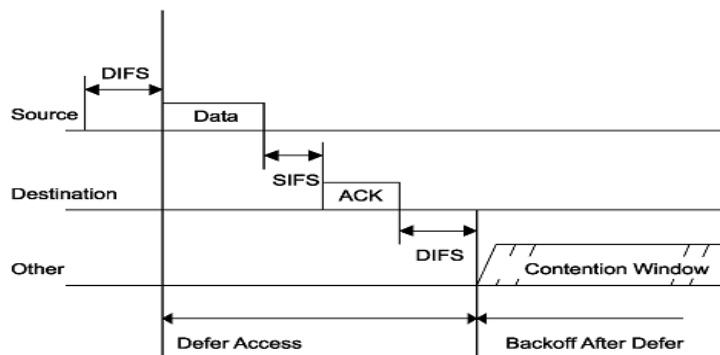
Figura 1.1. Ventana de Contienda



Cuando existe un intercambio de frames entre un punto de acceso (AP) y una estación (ST) utilizando el protocolo de acceso básico de DCF se puede describir de la siguiente forma: antes de enviar un paquete la estación transmisora AP o ST debe sensar el canal libre por un tiempo DIFS o EIFS para después realizar la cuenta regresiva de las ranuras de la ventana de contención mientras el canal este libre (cada ranura equivale a un tiempo llamado SIOTIME) cuando está cuenta regresiva alcanza el valor de cero la estación transmite, después que el paquete llega a la estación receptora AP o ST espera un tiempo llamado SIFS (Short interframe Space) para enviar su respectivo ACK el envío de este tipo de frames no requiere etapas previas de contención.

En la figura 1.2 se muestra un esquema para una transacción de un paquete de datos utilizando los estándares IEEE802.11b/g.

Figura 1. 2. Esquema para la transacción de un paquete de datos para el estándar IEEE802.11g/b



Fuente: Tomado de [6]

1.3.1. Slottime. Para el protocolo IEEE802.11g dentro del estándar se define en 9us, para el protocolo IEEE802.11b está definido en 20us. Este parámetro define otros parámetros dentro del estándar (DIFS, EIFS)

1.3.2. SIFS. Es el tiempo que debe esperar una transmisión para enviar tramas de un mismo diálogo, este tiempo separa cada trama de su ACK.

1.3.3. DIFS. Es igual a un SIFS más dos slottime, es el tiempo que debe esperar una estación para empezar a transmitir luego de encontrar que el canal está libre

1.4. Parámetros MAC que afectan el desempeño del 802.11 en redes de largo alcance. [30, 17]

1.4.1. ACKTimeout. Cuando se realiza un enlace de largo alcance se debe garantizar que después de enviar un paquete el tiempo ACKTimeout no expire antes de que exista un arribo del respectivo ACK, esto se debe al tiempo que tarda la señal en viajar entre las dos estaciones, el ACKTimeout debe ser igual al tiempo que se tarda en propagar al onda en la ida y vuelta entre el enlace punto a punto más el tiempo que una ST tarda entre que recibe una MPDU y envía su respectivo ACK, si esto no se cumple se generaran gran cantidad de retransmisiones las cuales conllevarían a que disminuya el throughput drásticamente, esto se debe a que cuando el transmisor desconoce el arribo de un paquete el receptor continuará enviándolo generando retransmisiones (7 como máximo) del mismo paquete que a su vez se colisionaran con los ACK por lo tanto la expresión final estará dada a continuación.

1.4.2. Slottime. Este parámetro define la probabilidad de colisión en el acceso básico del 802.11 dentro del estándar este parámetro está definido de tal forma que una estación siempre pueda determinar si otra estación a accedido al canal al inicializarse un slot previo y no generar una colisión.

Si el tiempo de propagación de ida y vuelta es menor que el slottime la estación A y B colisionaran cuando las dos estaciones transmitan en el mismo slot. En la figura 1.3 se muestra este caso

Si se selecciona el valor de slottime de tal forma que este sea menor a dos veces el tiempo de propagación pero comparable con este, se dice que la estación puede transmitir y las otras estaciones pueden seguir decrementando su ventana de contienda sin saber que la otra estación se encuentra transmitiendo por lo tanto se aumentara la probabilidad de colisión. En la figura 1.4 se presenta este caso.

Figura 1.3. Grafica cuando el slottime es mayor que 2 veces el tiempo de propagación

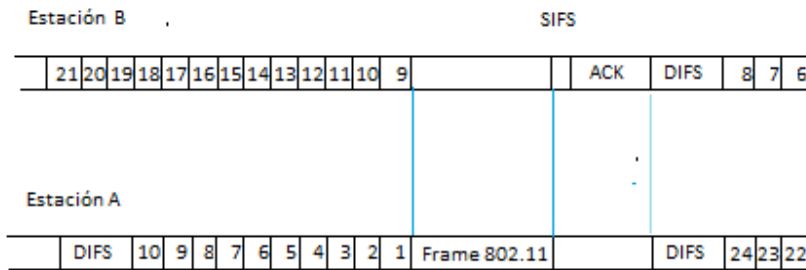
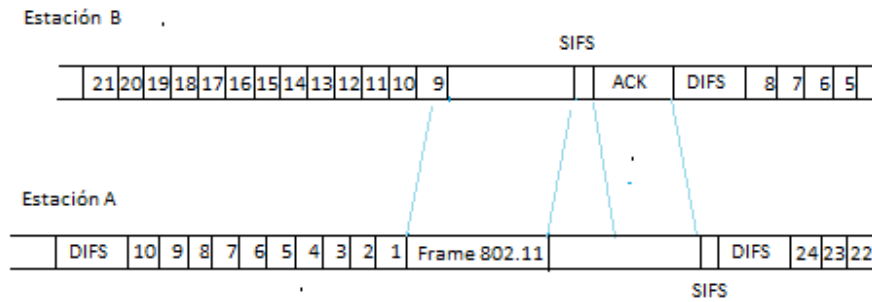
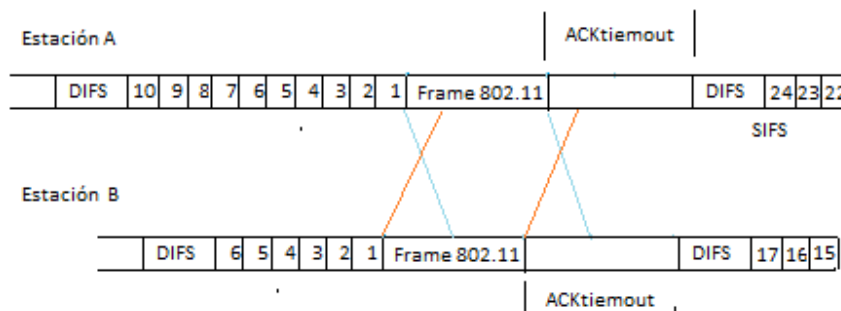


Figura 1.4. Grafica cuando el slottime es menor pero comparable a dos veces el tiempo de propagación

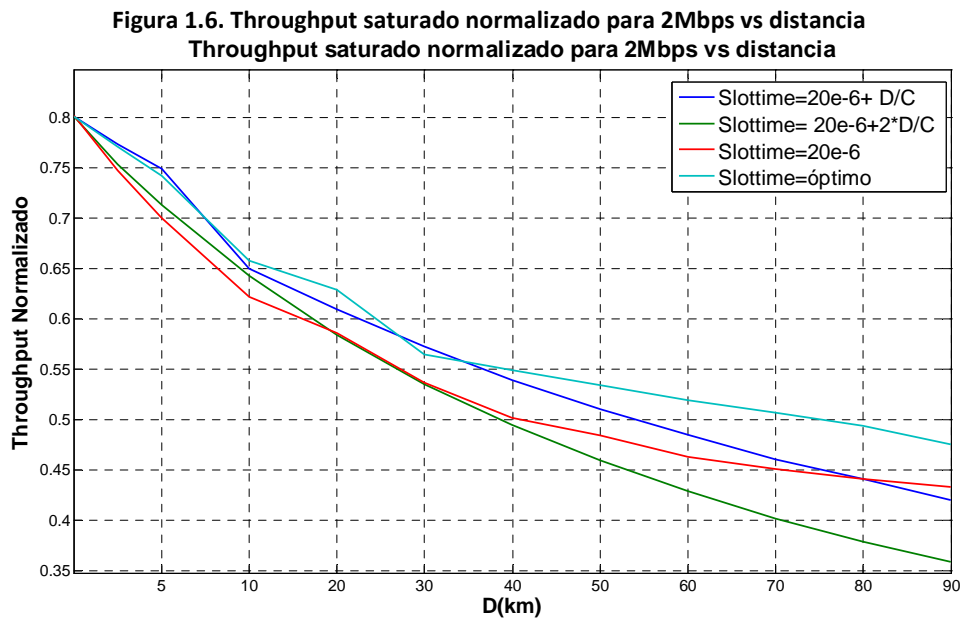


Quando se toma un valor para el slottime mucho menor que dos veces el tiempo de propagación se aumenta la probabilidad de colisión significativamente esto se debe a que si una estación transmite las otras estaciones no podrán percibir que el canal se encuentra ocupado en varios slottimes. En la gráfica 1.5 se presenta el último caso posible.

Figura 1.5. Grafica cuando el slottime es menor que dos veces el tiempo de propagación



Para poder analizar y medir como afecta la selección del slottime en el throughput se va a utilizar una maquina de estados desarrollada en [8] que me modela el comportamiento del throughput saturado sobre la capa mac del 802.11 en redes de largo alcance y miraremos como varia el throughput y los retardos en el estándar 802.11b para una velocidad de transmisión de 2Mbps.



Se puede apreciar que la diferencia entre el throughput con el slottime óptimo y el throughput con el slottime un poco mayor al tiempo de propagación su diferencia es apreciable después de los 40 km.

1.5 Cálculo del throughput TCP en redes de largo alcance. [20, 29]

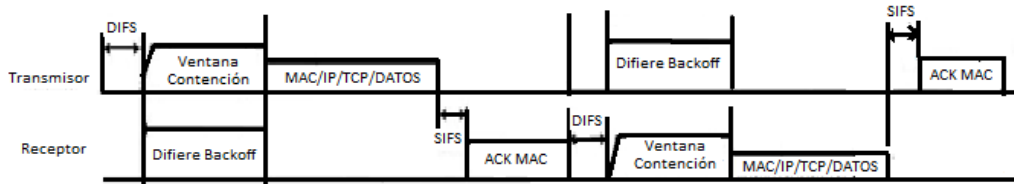
En la ecuación (1.1) se muestra la manera en la que se define el throughput para TCP

$$TH_{TCP} = \frac{L_T}{T_T} \quad (1.1)$$

Donde L_T se denota a la longitud del paquete TCP que se envía desde la capa de transporte, para el cálculo del máximo throughput es decir con el valor MTU de 1500bytes su toma que $L_{TCP} = 1480 \text{ byt}$

T_T se considera como el tiempo que transcurre cuando se realiza una transacción TCP entre la estación transmisora y la receptora.

Figura 1.7. Transmisión de un paquete TCP



Primero la estación transmisora (ET) sena que el canal se encuentre libre durante un DI , para inicializar la ventana de contención después que la ventana llega a cero la estación envía el paquete TCP, cuando la estación receptora (ER) recibe el paquete sin errores está espera un tiempo SI para confirmar el arribo del paquete con un ACK_MAC, como TCP es un protocolo orientado a conexión la ET necesita un ACK_TCP en el que confirma que arribo el paquete en buen estado a la capa de transporte (este ACK_TCP puede ser enviado después de arribar uno o varios paquetes TCP lo cual depende del algoritmo de congestión, la ventana TCP y las condiciones del enlace) por lo tanto la ER transmitirá un paquete TCP_ACK después que el canal este libre durante un DI y su ventana de contención llegue a cero, después se recibirá una notificación de su arribo por parte de la estación transmisora por medio de un ACK_MAC. En la ecuación (1.2) se presenta la manera de calcular el tiempo usado por una transacción TCP.

$$T_{\text{Transacción_TCP}} = T_{T_TCP} + T_{R_TCP} * F_{\text{congestion_TCP}} \quad (1.2)$$

T_{T_TCP} Es el tiempo que transcurre al enviar un paquete TCP. La ecuación (1.3) presenta la manera de calcularlo.

T_{R_TCP} Es el tiempo que transcurre al enviar un acuse TCP. Se puede encontrar usando la ecuación (1.4).

$F_{\text{TCPcongestion}}$ Es un factor que tiene la relación entre el arribo de paquetes TCP consecutivos enviados y su respectivo ACK transmitidos desde la capa de transporte.

$$T_{CP} = DIFS + \text{Backoff} + T_{DATOSTCP} + SIFS + 802.11_ACK + 2\delta \quad (1.3)$$

$$T_{R_TCP} = DIFS + \text{Backoff} + T_{ACK_TCP} + SIFS + 802.11_ACK + 2\delta \quad (1.4)$$

Donde:

SIFS Es el tiempo Short interface space

DIFS Es el tiempo Distributed interface space

$$DIFS = 2 * \text{Slottime} + SIFS$$

T_{DATOSTCP} Es el tiempo que tarda en enviar un frame de 1536 bites .

Backoff Es el tiempo que toma la ventana de contención en llegar a cero.

802.11 ACK Es el tiempo que tarda en enviar un ACK de capa MAC

T_{ACK_TCP} Es el tiempo que tarda en enviar un frame de 76 bites.

δ Es el tiempo de propagación

Para una red de área local utilizando el estándar 802.11 b operando a 11Mbps se obtienen los datos consignados en la tabla 1.1.

Tabla 1.1. Valores para TCP bajo el estándar IEEE802.11

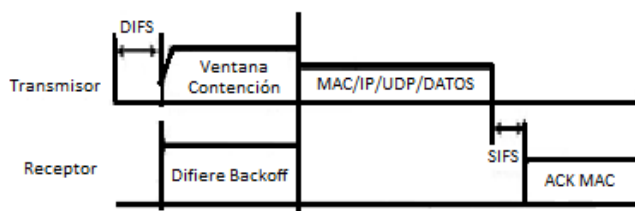
	Transmisor TCP	Receptor TCP_ACK
DIFS	50 μ s	50 μ s
Backoff	310 μ s	310 μ s
TCP sobre 802.11b	T_{DATOSTCP} 1213 μ s	T_{ACK_TCP} 151 μ s
SIFS	10 μ s	10 μ s
802.11_ACK	106 μ s	106 μ s
Transacción del frame	T_{T_TCP} 1,689 μ s	T_{R_TCP} * F_{TCPcongestion} 627*0.5 μ s
T_{Transacción_TCP}	2,002 μ s	

El throughput TCP en una red local bajo el estándar 802.11b es 5.91Mbps.

1.6. Calculo del throughput UDP sobre una red 802.11. [20, 29]

En la figura 1.8 se muestra la manera en la que los paquetes son enviados en UDP para el estándar IEEE802.11. A continuación se presentaran las ecuaciones que muestran la manera de calcular los valores de throughput para UDP bajo este estándar.

Figura 1.8. Transmisión de un paquete UDP



El throughput UDP está definido por usando la ecuación (1.5)

$$TH_{UDP} = \frac{L_U}{T_U} \quad (1.5)$$

Donde L_{UDP} es la longitud de un paquete con protocolo de transporte UDP teniendo una MTU de 1500 bites se tiene que el valor de L_{UDP} es 1470 bytes. El tiempo que transcurre en enviar un paquete UDP se encuentra con la ecuación (1.6)

$$p = DIFS + Backoff + T_{DATOSUDP} + SIFS + 802.11_ACK + 2\delta \quad (1.6)$$

Donde

$T_{DATOSUDP}$ Es el tiempo que tarda enviar un frame de 1526 bites .

Para una red de área local utilizando el estándar 802.11 en UDP se obtienen los datos consignados en la tabla 1.2.

El throughput UDP en una red local bajo el estándar 802.11b es 6.98Mbps.

Tabla 1.2. Valores para UDP bajo el estándar IEEE802.11

	Transmisor	UDP
DIFS		50 μ s
Backoff		310 μ s
TCF sobre 802.11b		TDATOSUDP 1208 μ s
SIFS		10 μ s
802.11_ACH		106 μ s
T_{Transmisión_TCP}		T_{T_TCP} 1,684 μ s

1.7. DEFINICIONES.

1.7.1. Throughput [22]. El throughput se define como la cantidad máxima de información que puede ser enviada en un enlace durante una unidad de tiempo. Con esta información se puede tener las características reales de la red para determinar su aplicación.

1.7.2. Tiempo de ida y regreso [22]. Es la diferencia entre el tiempo en que un paquete es enviado y el tiempo en que el mismo paquete es recibido nuevamente por el emisor, esta diferencia de tiempo indica el tiempo necesario para que un paquete viaje del emisor al receptor y vuelva al emisor nuevamente.

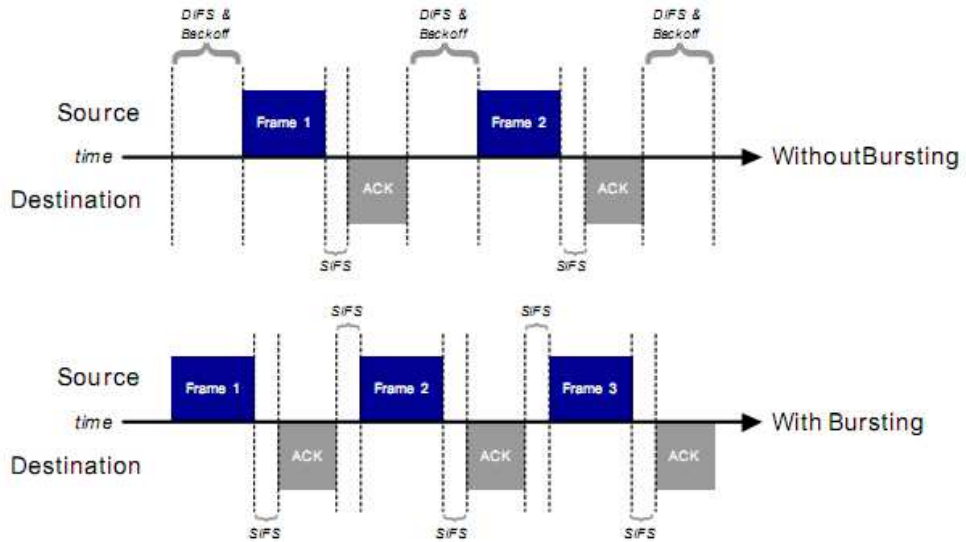
1.7.3. Jitter [22]. Se mide en milisegundos generalmente, indica un cambio en las medidas de una transmisión digital, ya que es la variación del tiempo de llegada de un paquete con respecto al valor esperado.

1.7.4. RSSI [36]. Son las siglas de Received Signal Strength Indication, el cual es una medida de potencia. Indica el RSSI de cada paquete indica la relación señal a ruido para los drivers de MADWIFI. Un nivel de RSSI de 40 o más se considera muy fuerte y permitirá las mayores tasas de transmisión de bits.

1.8. Técnicas para mejorar el throughput de un enlace bajo el estándar IEEE802.11g [2]

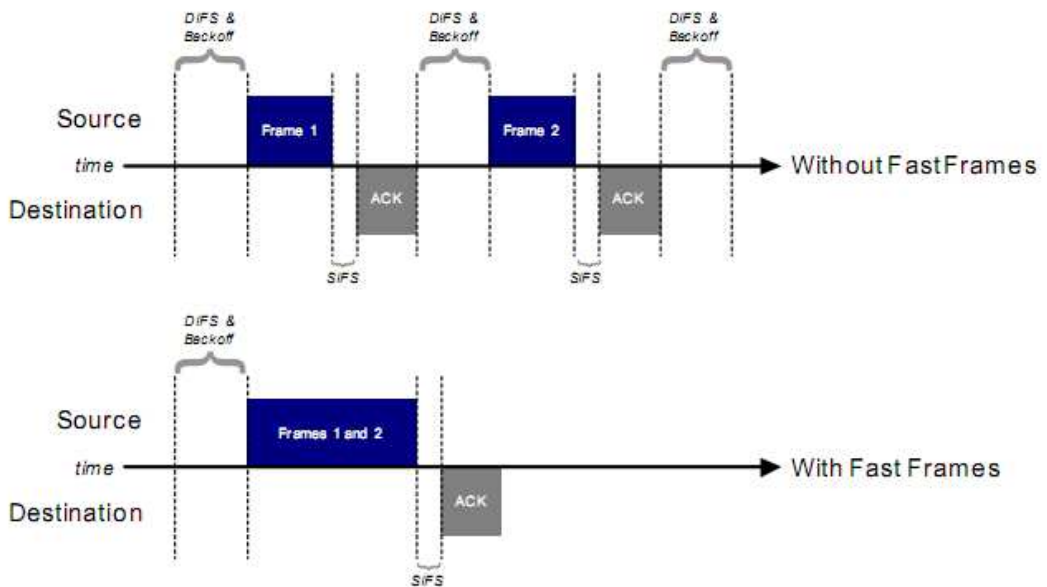
1.8.1 Bursting. Es una técnica que permite mejorar el throughput de una red WiFi. Esta técnica consiste en eliminar el tiempo de espera DIFS entre tramas de manera que se puedan enviar una serie de ellas de formas más rápida, la figura 1.9, compara una transmisión con y sin bursting.

Figura 1.9. Diferencia entre una transmisión con y sin bursting.



1.8.2. Fast Frame. Es otra técnica para mejorar el throughput de una red WiFi. Consiste en enviar dos frames unidos en uno solo, esto es posible debido a que el tamaño máximo del frame está limitado por el tamaño máximo permitido por una red Ethernet que es de 1500 bytes, sin embargo para una red WiFi tanto la estación como el Access Point pueden enviar frames de 3000 bytes, en la figura 1.10 se explica el funcionamiento con y sin fast frame.

Figura 1.10. Diferencia entre una transmisión con y sin Fast Frame.



1.9. ASPECTOS GENERALES DE RADIOPROPAGACIÓN

Esta sección pretende mencionar algunas definiciones esenciales tomadas de [3] que se traerán a colación cuando se trate el tema de los cálculos de potencia y configuración del software de simulación de los radio enlaces, Radio Mobile

1.9.1. Ganancia de la Antena. La ganancia de una antena determinada se puede definir según la antena de referencia que se escoja a seguir:

- a) Ganancia absoluta o isótropa (G_i): como su nombre lo indica, la referencia es una antena que irradia igual intensidad en todas las direcciones.
- b) Ganancia relativa a un dipolo de media onda (G_d): esta antena de referencia también está asilada en el espacio, cuyo plano ecuatorial contiene una dirección determinada.
- c) Ganancia relativa a una antena de conductor vertical corto (G_v): esta antena de referencia es más corta que un cuarto de longitud de onda, sobre y normal a la superficie de un plano conductor perfecto que contiene una dirección dada.

1.9.2. Potencia radiada efectiva. También en relación a tres antenas de referencia:

- i) Potencia isótropa radiada equivalente (PIRE): producto de la potencia aplicada a una antena y la ganancia de esta en una dirección dada relativa a una antena isótropica.
- ii) Potencia radiada equivalente (PRE): producto de la potencia aplicada a una antena y su ganancia en una dirección determinada relativa a un dipolo de media onda.
- iii) Potencia radiada equivalente a un monopolo (PREM): producto de la potencia aplicada a una antena y su ganancia en una dirección dada relativa a una antena corta vertical.

1.9.3. Efectos por la irregularidad del terreno. Una de las condiciones planteadas para este proyecto es la línea de vista entre los nodos a enlazar, debido a que el rango de frecuencias en el que se transmiten las señales hacen que estas sean muy sensibles a los obstáculos, aunque se cumpla esta condición la zona de Fresnel puede verse obstruida debido a que la altura de la antena pudiera no compensar la irregularidad del terreno, de manera que se deba tomar en cuenta las propiedades de reflexión, dispersión (las características del terreno o en general de un obstáculo puede hacer que la onda reflectada se disperse), refracción y eléctricas del suelo, además de los obstáculos como urbanización y vegetación. Siendo consecuente el modelo ITM [13] con las recomendaciones de ITU-R, estos factores se incluyen como parte de la configuración del software Radio Mobile utilizado para las simulaciones.

A continuación se dan algunos detalles sobre los efectos mencionados anteriormente. En la siguiente sección, se habla con más detalle sobre las pérdidas de transmisión y se destaca como el despeje de la zona de Fresnel tiene que ver con las pérdidas por difracción, además, el efecto de la vegetación en la atenuación de la señal de radio.

1.9.3.1. Reflexión. Para que una señal incidente en un obstáculo se refleje, al menos en parte, es necesario que éste tenga una profundidad mayor a la longitud de onda de la dicha señal. Para nuestro caso concreto, aplicando la ecuación (1.7), da como resultado una longitud de onda de 0.12 m.

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (1.7)$$

donde f es la frecuencia en Hz y para este caso v es la velocidad de la luz (3×10^8 m/s) y λ está en metros. Si hay suficientes obstáculos como para que se generen múltiples señales con múltiples caminos para llegar al receptor es posible que la calidad total de señal se mejore o degrade con respecto a la original. Al tener una longitud de onda del orden de los centímetros se podría pensar que es probable que se reflejen las señales en variados objetos, sin embargo, bajo las condiciones apropiadas de línea de vista y el uso de antenas direccionales hace que para nuestro caso, eso no sea un factor de mayor importancia.

En [37] se muestra que la magnitud de la señal reflejada es determinada por el coeficiente de reflexión, Γ . En la ecuación (1.8), la señal reflejada, P_2 , es directamente proporcional al cuadrado de Γ y es función del ángulo de incidencia, α , de la señal P_1 ; ϵ_r es la constante dieléctrica relativa del terreno, $\vartheta = 90^\circ - \alpha$ y $a = 1/\epsilon$ ó 1 para polarización vertical u horizontal, respectivamente.

$$P_2 = \Gamma^2(\alpha)P_1 \quad (1.8)$$

Donde

$$\Gamma(\theta) = \frac{\cos \theta - a\sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + a\sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta}}$$

1.9.3.2. REFRACCIÓN. Debido a la variación del índice de refracción de la atmósfera, el camino de la señal se curva siguiendo la superficie terrestre; para compensar esto, en estudios de propagación [19] se han planteado caminos en línea recta para las señales usando un factor de corrección k , entonces el radio efectivo de la tierra R_0 se cambia por

kRo ; siendo este factor normalmente de 4/3, lo cual alargaría el rango del transmisor más allá del horizonte visible.

1.9.3.3. Dispersión. Con la presencia de terrenos ásperos o desiguales, las señales que inciden sobre estos se pueden reflejar de manera difusa o extendida. Este efecto reduce la magnitud de la señal reflejada. Para definir la aspereza del terreno, Gibson [18] utiliza el parámetro h , el cual es la diferencia entre picos de corta distancia y canales de la altura del terreno, seguidamente se hace una comparación usando el criterio de Rayleigh (1.9): si $h < h_c$ entonces la superficie es considerada lisa, por lo tanto no hay pérdidas por dispersión, de otra manera la superficie es considerada desigual y el coeficiente de reflexión se multiplica por un factor de pérdidas por dispersión ρ_s . La ecuación de Bothias [18] se usa para calcular este factor (1.10)

$$h_c = \frac{\lambda}{8 \cos \theta_i} \quad (1.9)$$

$$\rho_s = \exp \left[-8 \left(\frac{\pi \sigma_h \cos \theta_i}{\lambda} \right)^2 \right] I_0 \left[8 \left(\frac{\pi \sigma_h \cos \theta_i}{\lambda} \right)^2 \right] \quad (1.10)$$

donde θ_i es el ángulo de incidencia, σ_h es la desviación estándar de la altura de la superficie sobre la media de la altura de la superficie y I_0 es la función de Bessel de primera clase de orden cero.

1.9.3.4. Características eléctricas del suelo. Las características eléctricas se pueden expresar mediante 3 parámetros: permeabilidad, μ , permitividad, ϵ , y conductividad, σ . La permeabilidad de la tierra normalmente puede ser considerada igual a la del vacío, mientras que la permitividad y la conductividad dependen de la frecuencia de trabajo y el tipo de terreno [27]; para nuestro caso se ha escogido uno de tierra media seca, para el cual la conductividad es de 0,005 S/m (Siemens por metro) y la permitividad relativa, ϵ_r , es de 15.

1.9.4. Pérdidas de Transmisión. Aquí se definirán que factores son los más relevantes y que definen el modelo de Longley-Rice que utiliza el software de Radio Mobile. Se van a diferenciar o separar en *pérdidas de transmisión por el espacio libre*, *pérdidas de transmisión básica* (en donde se destacan las pérdidas por difracción y vegetación), pérdidas de transmisión L , pérdidas del sistema y pérdidas totales.

1.9.4.1. Pérdidas de transmisión básicas en el espacio libre. A partir de la propagación en el espacio libre, tomando como referencia una antena isotrópica ideal libre de pérdidas y

teniendo en cuenta que las *pérdidas de transmisión básicas en el espacio libre* (L_{bf}) se definen como p_t/p_r , se obtiene la siguiente ecuación:

$$L_{bf} = 32.44 + 20 \log f + 20 \log d \quad (1.11)$$

donde f es la frecuencia de la señal transmitida en MHz y d la distancia del enlace en km.

1.9.4.2. Pérdida de transmisión básica. Agregando otros efectos se puede extender el concepto inicial a otros que se mencionan a continuación.

Pérdida de transmisión básica, L_b , la cual incluye el efecto del medio de propagación, listados a continuación

- (a) pérdida de absorción debida a los gases atmosféricos o en la ionosfera
- (b) pérdida de difracción debida a obstrucciones como vegetación o edificaciones
- (c) pérdidas de reflexión, incluyendo el enfoque o desenfoque de la curvatura de la capas reflectoras
- (d) difracción debida a irregularidades en el índice refractivo de la atmosfera o ionosfera o por hidrometeoros
- (e) pérdida de acoplamiento por la apertura al medio o la degradación de la ganancia de la antena, la cual puede ser debido a la presencia de un fenómeno sustancial de dispersión en el camino.
- (f) pérdida de acoplamiento de polarización, que puede ser debido a cualquier falta de coincidencia entre las polarizaciones de las antenas que participan en el enlace.
- (g) efecto de la interferencia de onda entre el rayo directo y los reflejados desde el suelo, otros obstáculos o capas atmosféricas.

1.9.4.2.1. Pérdidas por difracción y vegetación. Dentro de las pérdidas de transmisión básicas cabe destacar las pérdidas por difracción y las perdidas por vegetación, ya que por la geografía andina, más específicamente la de la región de Santander en Colombia, presenta bastantes irregularidades (colinas, peñas y montañas) y zonas boscosas o de vegetación espesa.

En [23, 10] se presentan modelos adecuados de para la difracción de las señales, mientras que la recomendación hecha por la ITU [28] describe más detalladamente la influencia de la vegetación de en al señal; cabe resaltar que este es un efecto que puede variar según la espesura y la especie de las plantas que estén en el camino de la señal, es por eso que la

atenuación debida a la vegetación es, en gran medida, un estimativo aproximado y definido por las experiencias de campo.

1.9.4.3. Pérdida de transmisión (L). La *Pérdida de transmisión L* incluye la directividad de las antenas transmisoras reales sin tener en cuenta las pérdidas del circuito de la antena.

1.9.4.4. Pérdida del sistema (L_s). La *Pérdida del sistema L_s* es obtenida de las potencias en los terminales de las antenas.

1.9.4.5. Pérdida total (L_t). La *Pérdida total L_t* es la razón determinada a conveniencia, especificando los puntos entre los sistemas transmisor y receptor.

2. ANTECEDENTES Y SITUACIÓN ACTUAL

En los últimos años la implementación de enlaces WiFi para largas distancias en zonas rurales se ha convertido en una rama de investigación muy importante para diversas universidades, centros de investigación y empresas que buscan de ésta forma prestar servicios de conectividad a las personas que se encuentran alejadas de las urbanizaciones, tratando de brindarles así una herramienta más, para progresar y mejorar sus condiciones y calidad de vida.

El grupo de investigación WAND de la Universidad de Waikato en Nueva Zelanda realizó un estudio en julio del 2004 titulado: "Connecting Rural Communities using WiFi" [2.1], en el cual se destaca que se trabajó sobre protocolo 802.11b (2.4 GHz), se desarrollo empleando una distribución de Linux, el prototipo tiene una antena de 15.5 dB, alimentación sencilla sobre cable de Ethernet y proponen versiones futuras con tarjetas miniPCI y tarjetas madre más pequeñas para reducir el tamaño del prototipo. Este grupo de investigación ha implementado 4 redes que permiten corroborar la viabilidad de los modelos: la red primaria es la CRCnet Waikato Network, construida en la Universidad de Waikato y se extiende al este de Hamilton aproximadamente 13.6 Km; la segunda red es la Routura School Network, un centro ICT (Information and Communications Technologies) en estructura de anillo que conecta a cinco escuelas; la tercera red es la Urewera National Park Wireless Network, la cual conecta a cuatro de las escuelas más alejadas de Nueva Zelanda ubicadas en le Parque Nacional de Urewera (Urewera National Park); la más reciente es la Rural Transkei, Eastern Cape, South Africa, esta red conecta el Hospital a una clínica en Transkei, Sur Africa, cuenta con dos repetidores (uno con alimentación típica y otro con alimentación solar) y tres enlaces inalámbricos. Los enlaces de las redes nombradas anteriormente están en los rangos de 0.5 Km a 17.4 Km, en la banda de los 2.4GHz [4]. Las propuestas hechas por este grupo de investigación son atractivas debido a que los terrenos se asemejan a la geografía que tenemos en las zonas de los andes Colombianos.

El grupo de investigación TIER (Technology and Infrastructure for Emerging Regions) de la Universidad de California en Berkeley en el área de la comunicación inalámbrica, con uno de sus principales estudios, WiLDNet: Network protocol design for WiFi based long distance networks [25], plantea la importancia de la tecnología WiFi para largas distancia en contraste con los altos costos de tecnologías (WiMAX, celular, satelital) viables solamente para densidades poblacionales muy altas en comparación con las encontradas en zonas rurales. Por otro lado, se especifican los problemas que se tienen al usar el protocolo 802.11, puesto que este está especificado para alcances cortos, lo cual supone que se debe usar un protocolo que se adecue a las condiciones de enlaces de largas distancias. Como conclusiones de este trabajo se tiene que WiFi es una alternativa de bajo costo efectiva,

siempre y cuando se haga un tratamiento adecuado del MAC y los protocolos de red, de manera tal que provean calidad de servicio para gran variedad de aplicaciones, administración remota y tolerancia a fallos causados por el funcionamiento inadecuado de un nodo de la red y enlaces no exitosos.

El grupo TIER también ha publicado otros estudios que contribuyen al mejoramiento de la tecnología inalámbrica para largas distancias los cuales se listan a continuación: monitorización remota, diagnóstico y administración de redes inalámbricas [2.4]; caracterización del canal inalámbrico [24]

La Pontificia Universidad Católica del Perú (GTR-PUCP) posee un grupo de Telecomunicaciones Rurales el cual ha desarrollado una investigación que busca reducir la brecha digital en las zonas rurales mediante el desarrollo de proyectos para el desarrollo de enlaces de datos en bandas WiFi en largas distancias [9]. La estrategia usada por este grupo consiste en el diseño del sistema mediante radio Mobile, después su implementación teniendo en cuenta el diseño del sistema de energía a utilizar y el diseño de las torres que se van a utilizar. El grupo ha realizado enlaces en Amazonas y en la frontera de Perú con Ecuador, conectando casi 100 comunidades rurales, también en la cuenca del río Napo instalaron una red WiFi que se extiende por 300km usando varios repetidores y además hicieron pruebas en una sierra en Cusco.

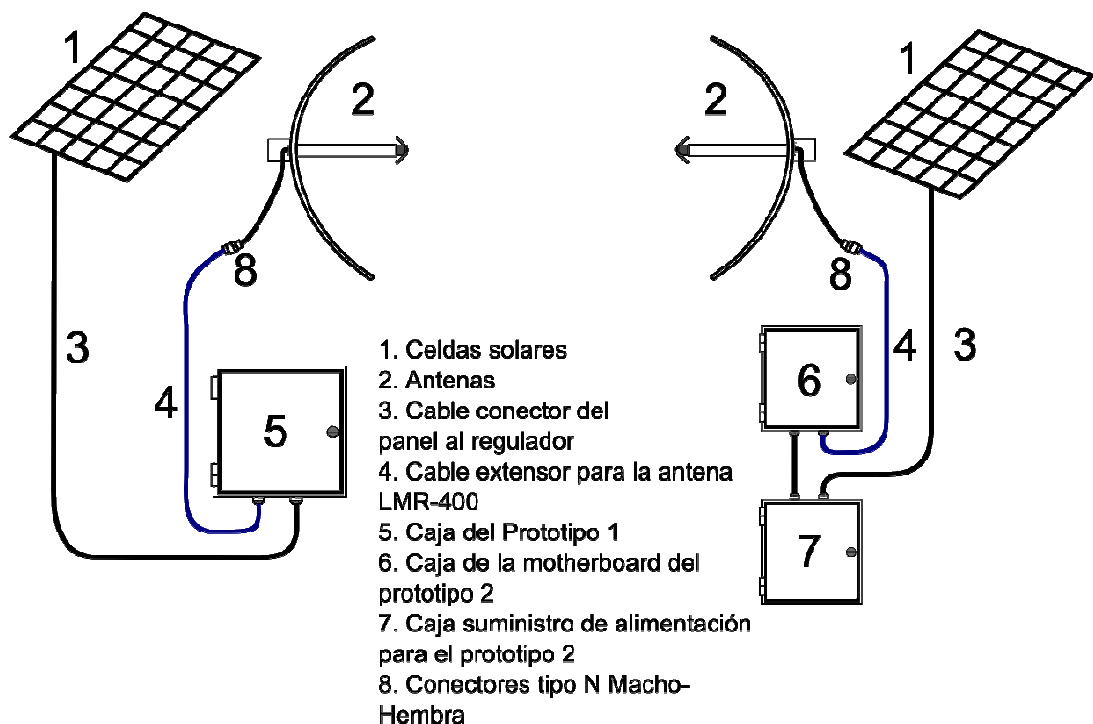
El Grupo de ingeniería Telemática de la Universidad del Cauca en colaboración con el Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones de la Universidad Rey Juan Carlos de España, ha realizado una investigación sobre la implementación de WiFi en zonas rurales [7]. Con los enlaces definidos se usaron diferentes herramientas de generación de tráfico para realizar las pruebas. Con estos resultados se concluyó que si el nivel de la señal es estable el enlace funcionará de mejor forma, además realizaron pruebas modificando valores de los tiempos que limitan el funcionamiento en la capa MAC, además de un estudio sobre esta capa en enlaces WiFi. Las pruebas se realizaron entre la Universidad y el Hospital rural del municipio Timbiquí de Caldas, estas pruebas se realizaron en el 2005, también se restableció el enlace de 36 km entre la universidad y el Cerro Nueva Guambía.

En Venezuela, la Universidad de los Andes ubicada en Mérida ha desarrollado enlaces WiFi usando el Router inalámbrico Linksys WRT54G el cual corre sobre Linux [2.9]. Estos enlaces son primero simulados usando Radio Mobile y después fueron implementados en el enlace entre Pico de Águila y el Baúl con una frecuencia central de 2412 MHz, obteniendo una longitud de enlace de 279 km.

3. PROTOTIPOS SISTEMA DE COMUNICACIÓN IEEE 802.11 PUNTO A PUNTO

El enlace de radio está conformado por 2 prototipos, cuya diferencia está dada por aspectos estructurales y de hardware. En la figura 3.1 se muestra un diagrama con los elementos externos y sus interconexiones. A la izquierda, el primero de los prototipos, el cual se configura a nivel de software como estación (STA) y lo llamaremos *Prototipo 1*, de manera similar llamaremos al otro, *Prototipo 2*, y este se configurará como *Punto de Acceso* (AP). En esta imagen se puede observar (numeral 4) el cable utilizado como extensor para la antena (LMR-400) y además se resalta en el numeral 8, que el terminal de dicho cable es con conector *tipo N macho*, mientras el conector terminal de la antena es un *tipo N hembra*. Los elementos internos del *Prototipo 1* se condensan en una sola caja (numeral 5) y la disposición espacial de los elementos y otros detalles se describen a profundidad en la sección 3.1. Por otro lado, para el *Prototipo 2* los mismos elementos internos del sistema se han dispuesto en dos cajas (cada una de las cuales es de menor tamaño que la del *Prototipo 1*): la caja señalada con el número 6 contiene únicamente la *motherboard*, mientras que la caja señalada con el número 7 contiene el resto de los elementos. Mas detalles acerca del *Prototipo 2* se verán en la sección 3.2.

Figura 3. 1. Esquema general de los dos prototipos propuestos

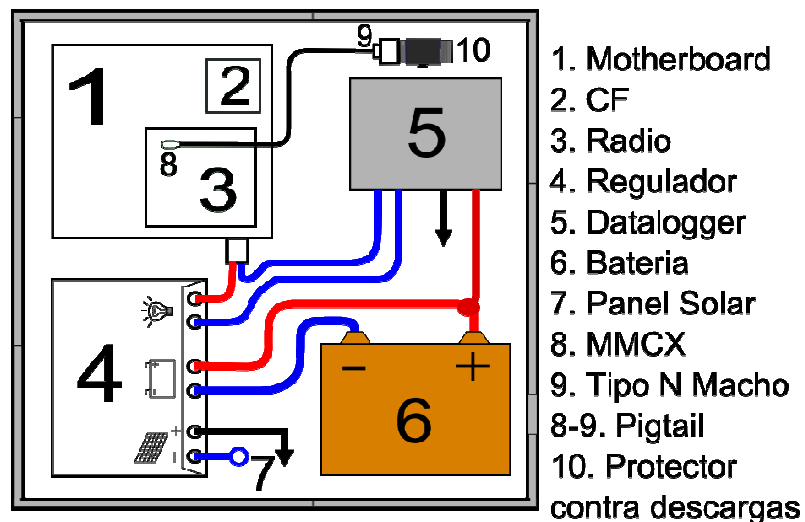


Fuente: los autores

3.1. PROTOTIPO 1, Estación (STA)

La distribución espacial de los elementos que conforman el hardware se muestra en la figura 3.2. El prototipo está conformado por una motherboard Soekris 4801 **(1)**, (ir a la sección 3.3 para más detalles) que es la encargada (en los dos prototipos) de ejecutar el kernel de Voyage (ir a la capítulo 6 para más detalles acerca del sistema operativo seleccionado) que contiene el controlador del radio transmisor que tiene el nodo; la memoria Compact flash **(2)** en la que se almacena e instala el sistema operativo, programas adicionales y datos; un radio XR2 de Ubiquiti **(3)** (especificaciones técnicas en la tabla 3.2) que trabaja bajo el estándar IEEE 802.11 b y g; y el sistema de alimentación fotovoltaica que está constituido por: un regulador o controlador de carga **(4)**, batería **(6)** y el panel solar. Por otro lado, el numeral **(7)** indica que esas conexiones van afuera de la caja hacia el panel solar (numeral **(1)** de la figura 3.1); el numeral **(8)** y **(9)** señalan el inicio (*conector MMCX*) y el fin (*conector tipo N macho*) del pigtail, el cual se conecta al cable extensor de la antena (LMR400) por medio del protector de descargas **(10)** (ver figura 3.2).

Figura 3. 2. Diagrama espacial y de conexiones del Prototipo 2, estación (STA)



Fuente: los autores

Además, hay que aclarar que el datalogger **(5)** está conectado de manera que almacena datos de tensión y corriente del sistema de alimentación autónoma, pero estos datos son recogidos para caracterizar el desempeño del sistema de alimentación y no corresponde a este trabajo ahondar más en este tema. Detalles más específicos sobre los elementos que conforman el sistema de alimentación se pueden encontrar en [21]

De igual forma, en la figura 3.3 y 3.4 se muestran fotografías del interior de la caja y del nodo completo del *prototipo 1* en una prueba de campo respectivamente.

Figura 3. 3. Fotografía del interior de la caja del *Prototipo 1*



Figura 3. 4. Montaje completo del *Prototipo 1* en una prueba de campo



3.2. PROTOTIPO 2, Punto de Acceso (AP)

Los elementos de hardware son los mismos que para el *Prototipo 1* (exceptuando el datalogger), pero la distribución espacial cambia al repartir dichos elementos en dos cajas de menor capacidad que la del *prototipo 1* (ver figuras 3.5 y 3.7). En la figura 3.5 se muestra una fotografía de este prototipo en una de las pruebas de campo. La caja que se encuentra a mayor nivel del suelo contiene la motherboard Alix2.D2 (ver sección 3.3 para más detalles) y a la cual también está conectado un radio XR2 (ir a la sección 3.4 para más detalles sobre el radio) en su puerto mini-PCI. La caja en la parte inferior contiene, por ende, el regulador y la

batería, pasando el cable de alimentación de la motherboard de la caja inferior a la superior, como muestra la figura 3.7.

Al comparar las figuras 3.5 y 3.5 se hace notoria la diferencia estructural a la que se hizo referencia en el inicio de este capítulo. Mientras el *prototipo 1* fue pensado para anclarse enterrándose en el suelo (figura 3.4) o sujetarse fuertemente a otra estructura firme (instalación en la terraza del Halley, sujetando el mástil de la estructura a una baranda de la terraza), el *prototipo 2* se pensó de manera que se pudiera trasladar más fácilmente utilizando una base metálica cuadrada que le diera más estabilidad y firmeza al mástil de la estructura (figura 3.5). Por otro lado, el *prototipo 1* tiene un esqueleto metálico (en la figura 3.8 se muestra con más detalle) que soporta el panel solar y la caja, mientras que el *prototipo 2* utiliza abrazaderas para sujetar el marco metálico que sostiene cada caja al mástil de la estructura y con esta misma técnica se sujeta la estructura que sostiene el panel solar (que puede variar su ángulo de elevación para ajustarlo según la incidencia de la radiación solar) a la parte más alta del mástil.

Figura 3.6. Fotografía caja del nivel superior del Prototipo 2 con motherboard

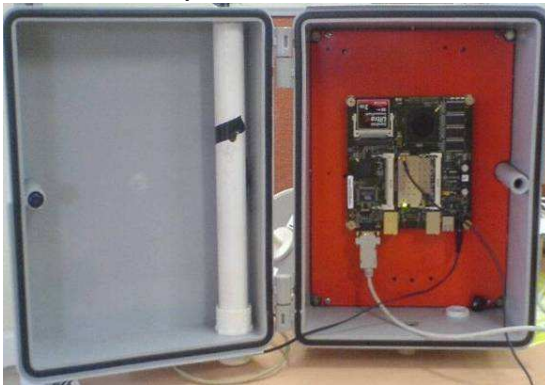


Figura 3.5. Fotografía del Prototipo 2



Figura 3.7. Fotografía caja del nivel inferior del Prototipo 2 con regulador y batería

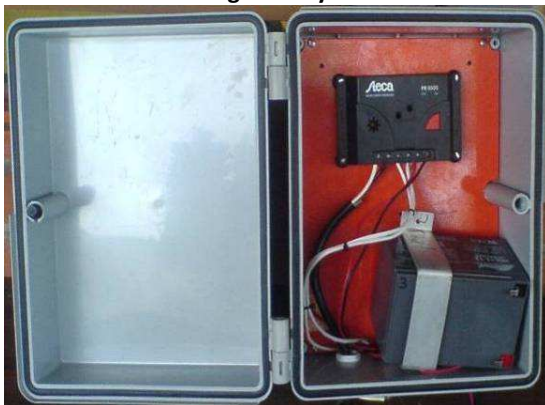



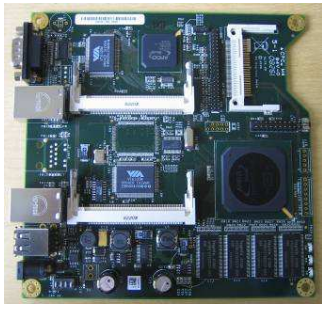
Figura 3. 8. Soporte metálico para el panel y la caja del *Prototipo 1*



3.3. Motherboard o tarjeta principal.

Como su nombre lo indica es el dispositivo central del sistema y se encarga de ejecutar el sistema operativo que sirve de plataforma para los controladores que manejan el radio XR2, configurándolo, por ejemplo, en modo estación (STA), maestro (AP) o ad-hoc dependiendo de la necesidad del sistema. La tarjeta tiene 3 elementos principales a destacar para un desempeño eficiente en una gran variedad de aplicaciones: el procesador, la memoria RAM y la memoria de almacenamiento para instalar el sistema operativo escogido, o en su defecto, un slot para memorias Compact Flash.

Tabla 3.1. Motherboards seleccionadas.

Referencia	Foto	Descripción
Soekris net 4801.48		233 MHz CPU, 128 Mbyte SDRAM, 3 Ethernet, 2 serial, USB connector, CF socket, 44 pins IDE connector, 1 Mini-PCI socket, 3.3V PCI connector Tamaño = 13,21 * 14,5 cm Potencia=15
Alix2.D2		CPU: AMD Geode LX CPU, 500 MHz (LX800) 5x86 DRAM: 256MB DDR SDRAM (333 or 400 MHz clock) Storage: CompactFlash + optional 44 pin IDE header for user's operating system and application Tamaño= 15,24 * 15,24 cm Potencia= 5W

En la tabla 1 se presentan las tarjetas escogidas para el proyecto junto con un resumen de sus principales características. El criterio de selección principalmente se basó en la preferencia por utilizar arquitectura x86 (en el capítulo 4 se puede observar con más detalle este criterio), con el objetivo de soportar trabajos futuros, una de las routerboards (Alix2.D2) se escogió de manera que se pudiera configurar como nodo pasarela o repetidor, puesto que posee dos puertos mini PCI para los radio transmisores, la otra routerboard (Soekris net 4801.48) no tiene las mismas exigencias al ser el nodo terminal, es por eso que se optó por elegir una de menor velocidad de procesamiento pero de menor precio; lo anterior se conjuga con la necesidad de contrastar al menos dos tipos de tarjetas distintas para al final poder hacer algunas recomendaciones. En la tabla 3.1 se muestran las algunas características generales, pero detalles mas específicos se pueden encontrar en las respectivas hojas de datos [13, 12].

3.4. Radios.

Son los dispositivos encargados de la transmisión y recepción de las señales de microondas. La selección del radio XR2 se basó en la alta sensibilidad y alta potencia de transmisión, con la aclaración de que esta debe ser acorde con las normativas de la *Federal Communications Comisión (FCC)* en la parte 15.247. En América se estable una máxima Potencia Isotrópica Radiada Equivalente (PIRE) de 4W (36 dBm), pero este nivel se puede superar con el uso de antenas direccionales [1]; para nuestro caso, con una antena de grilla de 24 dBi, el radio puede transmitir a un máximo de 24 dBm. Además, el radio se debe poder conectar a los puertos que se tienen disponibles en las motherboards, por lo tanto, el radio tiene conector para puerto mini PCI y puede trabajar en las frecuencias del estándar IEEE.802.11b/g. En la tabla 3.2 se presenta una breve descripción del radio seleccionado; para detalles referirse a [14], en el cual se encuentra el enlace de Internet para acceder a la hoja de datos del radio.

Tabla 3.2. Radio seleccionado.

Referencia	Foto	Descripción General
XTREMERANGE2 XR2		<p>Especificación del procesador: Atheros, 6th Generation, AR5414</p> <p>Operación del radio: IEEE 802.11b/g, 2.4GHz</p> <p>Interfase: 32-bit mini-PCI Type IIIA</p> <p>Voltage de operación: 3.3VDC</p> <p>Puerto para la antena: MMCX sencilllo</p> <p>Rango de temperatura: -45 to +90C</p> <p>Rata de transmisión de datos: 6Mbps, 9Mbps, 12Mbps, 24Mbps, 36Mbps, 48Mbps. 54Mbps</p> <p>Potencia de Transmisión Promedio: 28dBm, +/-1dB</p> <p>Máximo consumo de corriente: 1.30A, +/-100mA</p> <p>Alcance en interiores (Depende de la antena): Sobre los 200 metros</p> <p>Rango para exteriores (Depende de la antena): Sobre 50km</p> <p>Sistema Operativo que lo soporta: Linux MADWIFI,</p>

3.5. Antena.

Al radio se debe conectar una antena que es la encargada de amplificar y dirigir las señales convirtiéndolas en ondas electromagnéticas que se puedan transmitir en el espacio libre. Para este sistema de comunicación se usaran antenas de grilla de 24 dBi. La selección de una antena direccional es indispensable para alcanzar largas distancias con un nivel de potencia relativamente bajo, además, la FCC promueve el uso de este tipo de antenas al reducir tan solo 1/3 dBm PIRE máxima por cada 1 dBi en el aumento de ganancia de la antena, después de 6 dBi de ganancia para redes Punto-a-Punto, puesto que las antenas direccionales reducen la interferencia en el medio al tener menor patrón dispersión. Mas detalles acerca de la influencia de la antena en la transmisión de las señales se puede encontrar en la capítulo 1 y el anexo B, en la cual se muestra el patrón de transmisión de la antena en cuestión y como con este se define la forma en que propaga la señal.

Figura 3.9. Antena de grilla.



3.6. Pigtail y Protector contra descargas

El pigtail es el encargado de interconectar el radio con la antena. El extremo que se conecta al radio es un *conector MMCX* y el extremo contrario es un *conector tipo N macho*. Por otro lado, el portector contra descargas (ver figura 3.11) se utiliza, como su nombre lo indica, para proteger la motherboard y sus elementos contra descargas atmosféricas que puedan dañarlos y se conecta entre el pigtail y el cable extensor para la antena y este a su vez está conectado al sistema de puesta a tierra.

Figura 3.10. Pigtail MMCX a Tipo N Macho



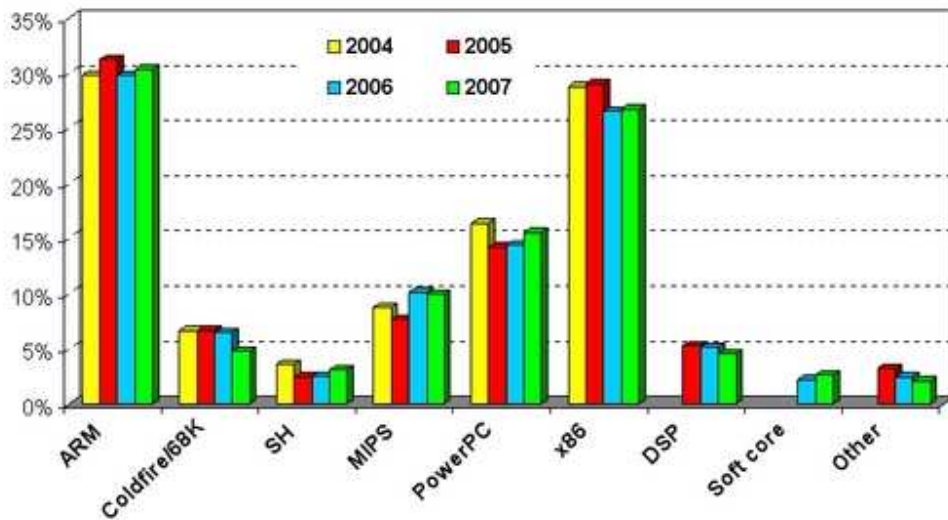
Figura 3. 11. Protector contra descargas



4. SELECCIÓN, IINSTALACIÓN Y CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA OPERATIVO Y LA RED PUNTO-A-PUNTO

El reto del proyecto consiste en lograr enlaces de largo alcance, con un bajo costo, consumo de energía, fácil implementación y mantenimiento. En este orden de ideas los sistemas embebidos cumplen con estos requisitos, pues están hechos a la medida para este tipo de aplicaciones, ya que en ellos se incluyen solo los elementos necesarios para implementar la aplicación. Durante la documentación se encontró que para estos dispositivos existe una amplia gama de procesadores a escoger, en la figura 4.1 se muestran los resultados encontrados por una encuesta realizada en el portal de Linux embebido Linuxdevices.com donde se encuentran los procesadores preferidos para el desarrollo de sistemas embebidos; se puede observar una clara preferencia por los procesadores ARM y x86; sumado a esto, el buen rendimiento encontrado en los antecedentes de enlaces WiFi de largas distancias (ver capítulo 4) apuntan a routerboards con procesadores x86, siendo estas al final la mejor opción para el proyecto. En el capítulo 5 se presentan otras características de las routerboards.

Figura 4.1. Tendencias de uso de los procesadores
Embedded processor preference trends



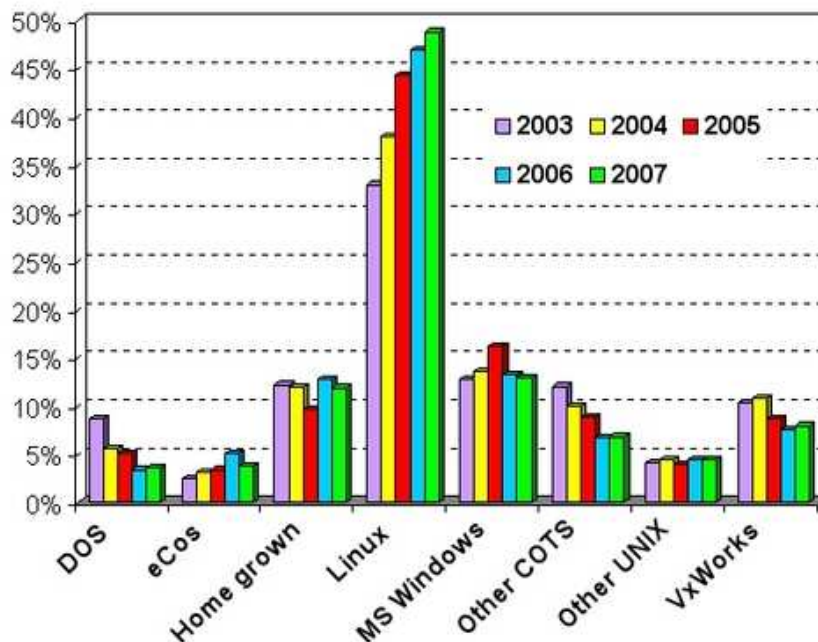
Fuente: portal de Linux embebido [32]

Luego de tener claro la tarjeta seleccionada, se procedió a hacer el análisis del sistema operativo conveniente para el desarrollo del proyecto, nuevamente un estudio realizado por el portal Linuxdevices.com arroja resultados que muestran claramente el dominio de GNU/Linux como sistema operativo, como se puede observar en la figura 4.2. Las ventajas que tiene Linux son conocidas ampliamente en el campo del desarrollo de software, debido

a que no se requiere una licencia para poder usarlo, además de la amplia disponibilidad de paquetes con las que se cuenta en todo el mundo para la realización de cualquier tipo de tarea computacional.

También se encontró que Debian es una de las opciones más populares de los desarrolladores de software para sistemas embebidos [33] La figura 4.3 muestra una tendencia de los sistemas operativos en los últimos años, donde claramente se ve una preferencia por Debian, esto es comprensible por la facilidad para encontrar distintos tipos de paquetes actualizados constantemente, además de la sencillez con la que son instalados.

Figura 4.2. Tendencias de uso para los sistemas operativos
Embedded OS sourcing trends



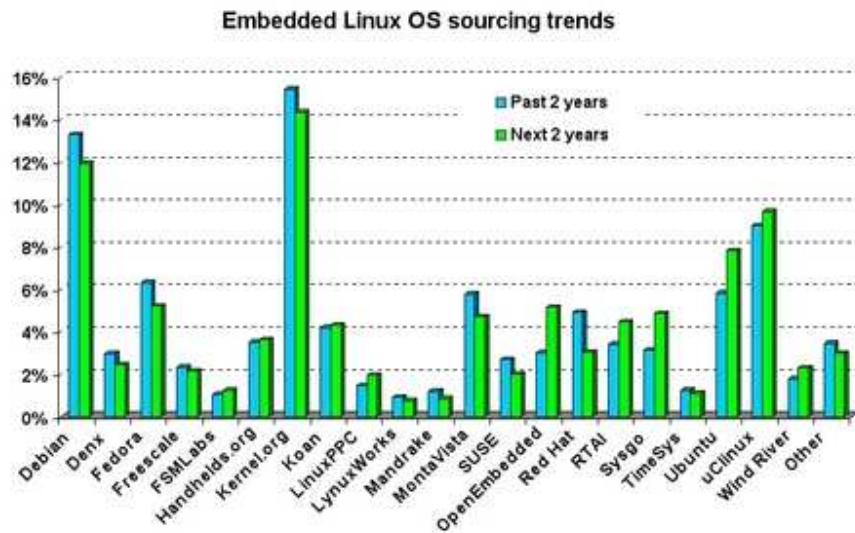
Fuente: portal de Linux embebido [32]

El sistema operativo que se buscó entonces debía tener como características principales: que estuviera basado en Debian, diseñado para sistemas embebidos x86 y que requiriera poco espacio en disco.

El sistema operativo escogido se llama voyage [34] el cual es basado en la distribución Debian Lenny r5.0, voyage está diseñado especialmente para sistemas embebidos x86 como las routerboards desarrolladas por Soekris y por Pc Engines (Fabricantes de las tarjetas Alix). Su instalación requiere entre 64MB y 128MB debido a que se eliminan todos los paquetes al

mínimo necesario para que Debian funcione apropiadamente. El kernel (núcleo de Linux) usado es el 2.6 el cual es el último disponible y además en la página principal de Voyage se encuentran continuas actualizaciones sencillas de implementar en las routerboards.

Figura 4.3. Tendencia de uso de los desarrolladores de software para sistemas embebidos



Fuente: Portal de Linux for Devices [33]

Al kernel además se le debe cargar el módulo para que reconozca las tarjetas radios. El modulo usado para este tipo de radios es el de MADWIFI (Multiband Atheros Driver for WiFi), el cual es un driver para el estándar IEEE 802.11 a/b/g para tarjetas con chipset Atheros como su nombre lo indica.

La versión del sistema operativo descargada de la página web fue Voyage Linux 0.6.2 que en ese momento era la última disponible, sin embargo el driver de Madwifi que incluye esta versión (r4022) presenta unos problemas cuando se usa el modo de Acces Point, es por esta razón que luego de la instalación, es recomendable cambiar el driver de Madwifi por su versión estable (0.9.4rc2).

4.1. Instalación del Sistema Operativo Voyage Linux sobre una memoria C.F e instalación del driver de Madwifi estable.

A continuación se explica la manera como debe instalarse Voyage en una Compact Flash (CF) externa y cómo cambiar el driver de Madwifi. Una vez descargado el software en un computador con Linux, se debe descomprimir, conectamos la CF al computador y en una ventana de comandos de Linux listamos los discos montados en el momento usando el siguiente comando:

fdisk -l

Después de seleccionar el directorio en el que se encuentra la unidad montada se debe desmontar y formatear usando los siguientes comandos:

```
umount /dev/sdb1          >>para desmontar la unidad que para el ejemplo es sdb1
mkfs.ext3 /dev/sdb1      >>para formatearla.
```

Luego se debe crear el directorio cf dentro de mnt, que es el lugar en el que los sistemas Unix ubican las unidades montadas como la unidad de cd o en nuestro caso la memoria CF, el comando usado es:

```
mkdir /mnt/cf
```

de esta forma ya la memoria esta lista para almacenar el sistema operativo voyage, por lo tanto el paso siguiente es descomprimir el archivo descargado y en una ventana de comandos se debe entrar a la carpeta que se acaba de descomprimir y se digita el siguiente comando:

```
./usr/local/sbin/voyage.update          >>con este comando ejecutamos el instalador de voyage.
```

Luego el sistema preguntara que queremos hacer y ofrece 3 opciones

```
1 - Create new Voyage Linux disk
2 - Update existing Voyage configuration
3 - Exit
(default=1 [Create new Voyage Linux disk]): 1
```

Para la instalación seleccionamos el paso 1 como se muestra anteriormente
Y el sistema nos devuelve el siguiente mensaje preguntándonos la ubicación de la ubicación del S.O:

```
Where is the Voyage Linux distribution directory?
(default=/root/Desktop/voyage-0.6.0/usr/local/sbin): /root/Desktop/voyage-0.6.0/
```

Luego se deben realizar los primeros 5 pasos de la siguiente lista, con el fin de configurar el sistema operativo voyage para la motherboard usada:

```
What would you like to do?  
1 - Specify Distribution Directory  
2 - Select Target Profile  
3 - Select Target Disk  
4 - Select Target Bootstrap Loader  
5 - Configure Target Console  
6 - Copy Distribution to Target  
7 - Exit  
(default=7 [Exit]):
```

El paso 6 se usa para almacenar voyage junto con su configuración para la motherboard en la C.F, aunque antes nos arroja un resumen de las opciones seleccionadas, a continuación se muestra el ejemplo realizado para una motherboard Alix:

Configuration details:

```
-----  
Distribution directory: /root/Desktop/voyage-0.6.0
```

```
Disk/Flash Device: /dev/sdd  
Installation Partition: /dev/sdd1  
Bootstrap Partition: /dev/sdd1
```

```
Will be mounted on: /mnt/cf
```

```
Target system profile: WRAP  
Target console: serial  
Target baud rate: 9600
```

```
Bootstrap installer: grub  
Bootstrap partition: /dev/sdd1
```

```
OK to continue (y/n)? y
```

Con esto se termina la instalación de voyage 0.6.2, ahora se debe para cambiar el driver de Madwifi, para hacer esto lo más sencillo es descargar uno de los módulos de madwifi, el usado para este proyecto fue el 0.9.4rc2 descargado de la misma página de voyage y se instala con el comando dpkg. A continuación se muestran los comandos usados para realizar dicho cambio de driver:

wget http://www.voyage.hk/dists/0.6/madwifi/madwifi-modules-2.6.26-486-voyage_0.9.4-rc2-1+6.0-3_i386.deb

dpkg -i madwifi-modules-2.6.26-486-voyage_0.9.4-rc2-1+6.0-3_i386.deb

4.2. Comandos para la configuración de los nodos de la red Punto a Punto (PtP)

A continuación se presentara un listado de los comandos usados para la realización de este proyecto con una breve explicación de cada uno de ellos junto con la tabla 4.1 en la que se presenta un resumen de dichos comandos

Tabla 4.1. Resumen de los comandos de configuración de los sistemas de comunicación

Comando		Parámetro Modificado
iwconfig + (interfaz)+	essid	Nombre de la red
	freq	Frecuencia de operación del enlace
	channel	Canal de trabajo del enlace
	ap	Ajusta la MAC del AP a cual conectarse
	rate	Máxima rata de bits del nodo
	rts	tamaño del paquete para rts/cts
	frag	Tamaño máximo de fragmentación
	key	Contraseña de la red
txpower	Potencia de trasmisión del radio.	
Comando		Parámetro que permite visualizar
iwlist + (interfaz)+	scan	Cantidad de AP disponibles
	freq	Frecuencias de operación del radio
	channel	Canales de operación del radio
	rate	Ratas soportadas por el radio.
	txpower	Potencias de trasmisión del radio
	modu	Modulaciones permitidas por el radio
	help	Ayuda del comando
Comando		Parámetro de la tabla de rutas que varía
route +	-net	Agrega una red a la tabla de rutas
	default gw	Añade una puerta de enlace por defecto
	del	Elimina una ruta
Comando		Tiempo modificado en la capa MAC
sysctl -w dev.wifi0.acktimeout		Cambia el acktimeout
sysctl -w dev.wifi0.ctstimeout		Varia el ctstimeout
sysctl -w dev.wifi0.slottime		Cambia el valor de slottime

4.2.1 Comandos de configuración de la red (Iwconfig y Wlanconfig).

4.2.1.1 iwconfig. El comando más usado es **iwconfig** y viene cargado con varios drivers además del de Madwifi. En Linux se puede usar el comando `man iwconfig` o `iwconfig --help` para tener un listado y una breve explicación de las principales opciones con las que cuenta, las cuales son:

iwconfig --versión: Mediante este comando se encuentra la versión de iwconfig que se está usando.

iwconfig [interface]: Sirve para obtener la configuración actual de la interfaz inalámbrica seleccionada. Este comando puede ir seguido de algunos parámetros que permiten cambiar dicha configuración. Los parámetros son

iwconfig interface [essid X] [freq F] [channel C] [sens S] [ap A] [rate R][rts RT] [frag FT] [txpower T] [enc E] [key K] [retry R]

A continuación se realizará una explicación de cada uno de ellos y la manera de usarlo.

- **Essid:** Nombre de la red a la cual se está accediendo. Si se está como AP, con este comando se ajusta el nombre, si esta como cliente la tarjeta intentará conectarse a la red con dicho nombre.

iwconfig ath0 essid "nombre de la red"

- **Freq y Channel:** como su nombre lo indica establece la frecuencia y el canal en el que se va a trabajar.

iwconfig ath0 channel 08.

- **Ap:** permite apuntarle a un AP, se debe especificar con la MAC del AP.

iwconfig ath0 ap 00:00:00:00:00:00.

- **Rate:** Selecciona la máxima rata de bits para los paquetes transmitidos.

iwconfig ath0 rate 48M.

- **RTS:** Ajusta el mínimo tamaño del paquete para activar rts/cts, si se pone en off se deshabilita rts/cts. El protocolo RTS/CTS sólo se activa cuando los paquetes alcanzan un tamaño determinado, de esta manera cuando el paquete es muy grande se envía un RTS para avisar que se va a transmitir y evitar las colisiones entre nodos transmitiendo a un mismo AP.

iwconfig ath0 rts 30

- **Frag:** Establece el tamaño máximo de fragmentación. (Tamaños más grande del paquete).

iwconfig ath0 frag 512.

- **Key:** Configura la contraseña de la red en hexadecimal.

iwconfig ath0 key ACDE-BACD-FF

- **Txpower:** Implanta la potencia de transmisión de los paquetes. Si se usa auto queda con control de potencia automático, si se deja en off se deshabilita la transmisión del radio.

iwconfig ath0 txpower 18

4.2.1.2 Wlanconfig. Así mismo el driver de MADWIFI, permite que se tengan varios dispositivos inalámbricos como AP y/o estaciones. Para configurarlos, se debe configurar interfaces virtuales para cada uno, el comando usado para crear una de estas interfaces es:

wlanconfig ath0 create wlandev wifi0 wlanmode ap

en donde ath0 es la interfaz que se está configurando y wifi0 el nombre del dispositivo de red inalámbrico asignado para el radio, así mismo se puede configurar como AP o como estación variando el parámetro ap por sta.

wlanconfig permite tener la tarjeta en modo AP, estación y monitor.

4.2.2. Comando de visualización de parámetros de la red (iwlist). Es un comando usado para visualizar información sobre la red inalámbrica que no es mostrada por iwconfig. Los parámetros que pueden observarse se muestran a continuación junto con una breve explicación.

```
iwlist [interface] scanning  
iwlist [interface] frequency  
iwlist [interface] rate  
iwlist [interface] txpower  
iwlist [interface] retry  
iwlist [interface] event  
iwlist [interface] modulation  
iwlist --help  
iwlist --version
```

- **Scan:** Da una información de los AP que el radio detecta además de algunas características de dichos AP.
- **Freq/channel:** Lista las frecuencias y los canales disponibles a los cuales puede funcionar el radio.
- **Rate:** Muestra la rata de bits soportada por el radio.
- **Txpower:** Muestra la potencia de transmisión disponible en el radio.
- **Modu:** permite observar las modulaciones que soporta el radio.
- **Version:** muestra la versión usada.
- **Help:** muestra una ayuda del comando.

4.2.3. Comando privativo del controlador Madwifi (iwpriv). Para complementar el comando iwconfig que se caracteriza por venir incluido en la mayoría de los drivers, se creó

el comando `iwpriv`, el cual ajusta parámetros específicos de cada driver, permitiendo configurar ciertas opciones dependiendo del driver usado, para obtener un listado de los parámetros que permite configurar cada driver basta con ejecutar el comando `iwpriv` con lo cual se obtendrá una lista de todas las opciones para las interfaces. Sin embargo para el desarrollo del proyecto no se tuvieron en cuenta estos comandos.

4.2.4 Comando de enrutamiento (route).

El comando `route` permite visualizar y crear la tabla de rutas de la red. Los comandos más usados son:

- **route -net:** este comando permite agregar una red a la tabla de rutas

```
route add -net 192.168.46.0 netmask 255.255.255.0
```

- **Route add default gw:** permite agregar una puerta de enlace que quedará establecida por defecto.

```
route add default gw 192.168.47.1
```

- **Route del:** Este comando se usa para eliminar una ruta.

```
route del default gw 192.168.47.1
```

4.3. Configuración de los nodos de la red PtP

Para tener una idea clara de la aplicación de los comandos previamente listados y de su correcto uso a continuación se presenta la manera como se configuró una motherboard como AP, los comandos presentados a continuación se deben grabar en el archivo de texto interfaces el cual se encuentra en la carpeta `/etc/network` y se puede variar con el editor de texto `vi`.

```
auto ath0  
iface ath0 inet static  
address 192.168.47.1  
netmask 255.255.255.0  
network 192.168.47.0  
broadcast 192.168.47.255  
madwifi-base wifi0  
pre-up wlanconfig ath0 create wlandev wifi0 wlanmode ap
```

```

wireless-mode Master
up iwpriv ath0 mode 3
up iwconfig ath0 mode master
up iwconfig ath0 essid voyage
up iwconfig ath0 txpower auto
up iwconfig ath0 enc off
up iwconfig ath0 rate auto

```

Además del archivo anterior, se creó un script el cual se ejecuta automáticamente al encender la motherboard y el cual activa la interfaz inalámbrica con todos los parámetros previamente ajustados, además también carga la tabla de rutas desarrollada para la red creada.

El script de la motherboard que esta como estación tiene los comandos:

```

iface ath0 inet static
address 192.168.47.41
netmask 255.255.255.0
network 192.168.47.0
broadcast 192.168.47.255
madwifi-base wifi0
pre-up wlanconfig ath0 create wlandev wifi0 wlanmode sta
wireless-mode Master
up iwpriv ath0 mode 3
up iwconfig ath0 mode master
up iwconfig ath0 essid voyage
up iwconfig ath0 txpower auto
up iwconfig ath0 enc off
up iwconfig ath0 rate auto
ifconfig ath0 up ; Activa la interfaz virtual ath0
route add default gw 192.168.47.1
route add -net 192.168.46.0/24

```

Mediante el penúltimo comando se agrega la puerta de enlace predeterminada del nodo que se está configurando, mientras que el último parámetro permite agregar la dirección de una red al nodo.

4.4. Modificación de los tiempos de la capa Mac.

El comando usado para la modificación de tiempos es sysctl, el cual permite modificar y conocer los parámetros del kernel que se está usando, estos parámetros vienen ajustados por defecto de acuerdo a los requerimientos del sistema

- Para cambiar el tiempo acktimeout se usa el comando:

```
sysctl -w dev.wifi0.acktimeout=74
```

- Para cambiar el ctsttimeout se usa el comando:

```
sysctl -w dev.wifi0.ctsttimeout = 74
```

- Y para cambiar el slottime se usa el comando:

```
sysctl -w dev.wifi0.slottime = 35
```

En los ejemplos anteriores se ajusto el valor de acktimeout y de ctsttimeout en 74 y el slottime en 35.

5. METODOLOGIA DE PRUEBAS

Para la caracterización de enlaces bajo el estándar IEEE 802.11 operado sobre redes de área extensa se desarrollo una metodología de pruebas que permite establecer el throughput que puede soportar enlaces punto a punto de largo alcance configurando los parámetros MAC del 802.11b/g. Para realizar enlaces punto a punto se utilizan los prototipos descritos en el capítulo 5 en modo infraestructura: uno configurado como estación (STA), “*Prototipo 1*” y el otro configurado como Punto de Acceso (AP), “*Prototipo 2*”. En las siguientes secciones se describe el flujo a seguir para obtener los resultados expuestos en el capítulo 6, el cual se resume en el diagrama flujo de las figuras 5.1 y 5.2, las cuales muestran la metodología para medir y documentar el troughput y el RSSI de las pruebas de campo, respectivamente. Para las pruebas de laboratorio se obvia la alineación de las antenas y el uso del generador de señales RF y dispositivo Wi-Spy. Dentro de la sección 5.5 se explica mas detalladamente el diagrama de flujo de la figura 5.2.

Figura 5.1. Diagrama de flujo para la medición del troughput

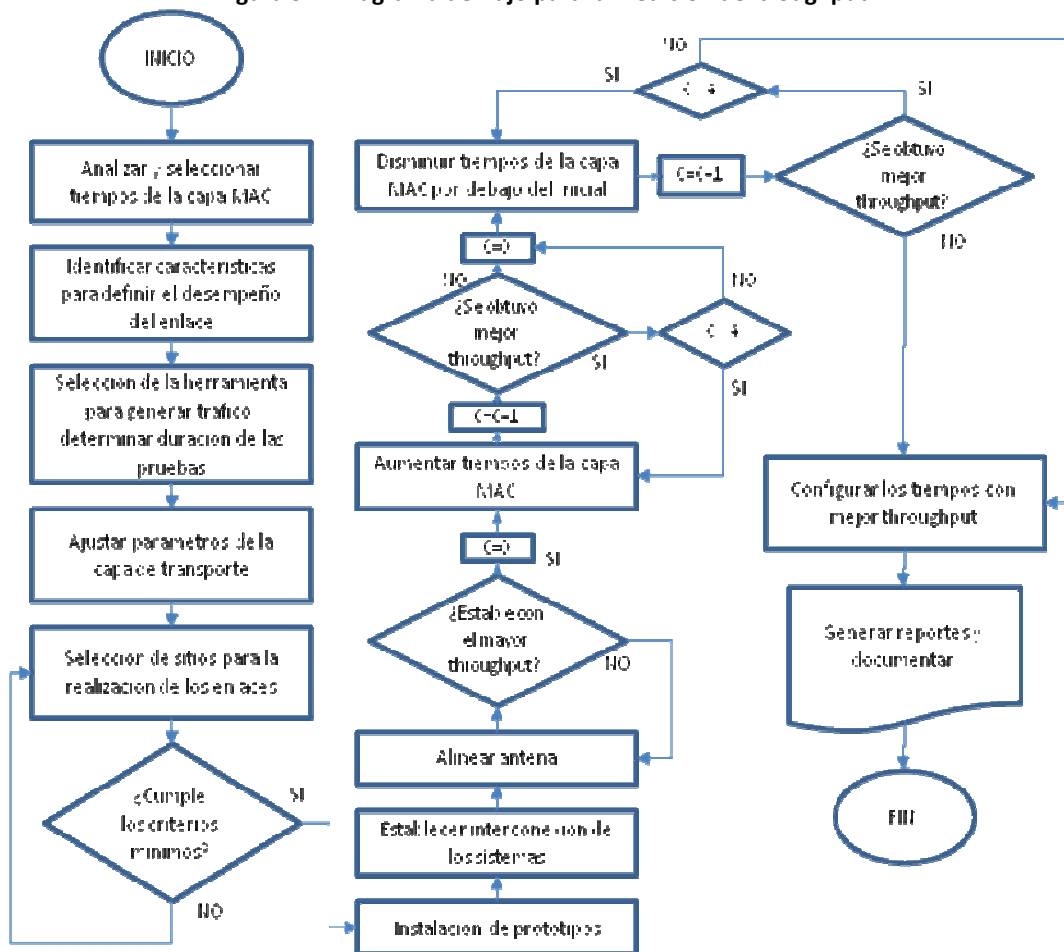
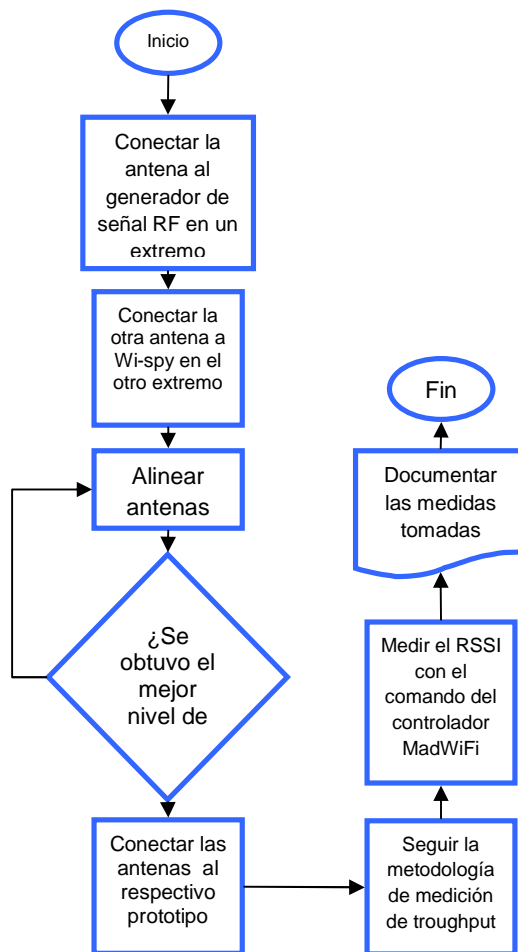


Figura 5.2. Diagrama de Flujo de medición del nivel de Intensidad RSSI



5.1. Analizar y seleccionar los parámetros MAC del 802.11 para mejorar las prestaciones en enlaces de largo alcance.

El desempeño de la capa MAC del 802.11 sobre redes de área extensa se describió en el marco teórico. De este análisis se pudo concluir que el valor del ACKtimeout seleccionado debe ser mayor que dos veces el tiempo de propagación para garantizar un tiempo de espera que expire después de que arribe el acuse y evitar las retransmisiones innecesarias. Para el parámetro slottime se analizó este valor incide en la probabilidad de colisión debido a que para ciertos valores que tome la ventana de contención puede disminuir por no percibir que la estación transmite, en el caso de que se utilice el modo bursting este no se iniciara hasta que el medio se encuentre libre de transmisiones en un tiempo DIFS este valor depende del slottime, por lo tanto los parámetros seleccionados son:

$$ACKtimeout = ACKtimeout_{local} + \frac{2 * distancia}{C} \tag{5.1}$$

$$\text{slottime} = \text{slottime}_{\text{estandar}} + \frac{2 * \text{distancia}}{C} \quad (5.2)$$

donde el valor de $\text{ACKtimeout}_{\text{local}}$ es 48 μs y el valor del $\text{slottime}_{\text{estandar}}$ es 20 y 9 μs cuando se utiliza el estándar 802.11b/g, respectivamente.

5.2. Identificar las características para determinar el desempeño de un enlace punto a punto de área extensa 802.11b/g.

Las características seleccionadas para evaluar el desempeño de la red son el throughput para TCP y UDP y el nivel de señal RSSI.

5.3. Seleccionar el generador de tráfico, ajustar los parámetros de capa de transporte para realizar las mediciones de las características, determinar el mínimo tiempo de duración de las pruebas.

Para la realización de las medidas de throughput generando tráfico TCP debe garantizar que el tamaño de la ventana seleccionada no incida sobre las medidas realizadas, el tamaño de la ventana seleccionada dividida entre el round trip time debe ser mayor que el máximo throughput esperado en enlace punto a punto. Para la metodología de pruebas se tomó una ventana de 16 kbytes. Solo se podrá tener un rendimiento aproximado de 1,6 Megabits por segundo (Mbps) en una ruta con 100 ms de RTT, este valor es independiente del ancho de banda real. Se encontró que para validar las mediciones mostradas por la herramienta se debe esperar un tiempo mínimo de 10 segundos. Para las pruebas de más corta duración se escogió un tiempo de 180 segundos en total.

Cuando se desea caracterizar el desempeño de una red primero se deberá determinar que métricas permiten determinar el comportamiento se selecciono como métricas el throughput, retardos, jitter y los paquetes perdidos. Para determinar el desempeño de la red se utilizo la herramienta iperf [16], este es un generador de tráfico que permite realizar mediciones de las características throughput TCP y UDP, retardos, jitter y paquetes perdidos, entre dos puntos que hacen parte de una misma red. Las características más representativas de este generador de tráfico son:

- El servidor puede tener múltiples conexiones.
- Se puede especificar la cantidad de datos a ser transferidos, la tasa de generación y el tiempo que se desea que permanezca activa la transmisión.
- Las opciones pueden ser especificadas en k (kilo-) y M (mega-).
- Reporta throughput, delay, jitter y datagrams lost en intervalos de tiempo especificados.

Esta herramienta se puede instalar en diferentes sistemas operativos OS. Para el OS Voyage Linux, se puede manejar de manera remota a través del puerto serial o los puertos de red. En la sección 7.1.1 se explica con mayor detalle los comandos a ejecutar una vez se a empezado a manipular el Sistema Operativo, previamente instalado en la motherboard (ver capitulo 6).

5.3.1. Configuración de iperf para TCP. Se describe la configuración del generador de tráfico iperf en cada nodo para comenzar a generar el tráfico con TCP. El nodo estación se configura como servidor con el siguiente comando:

```
iperf -s &
```

El símbolo & se usa para que iperf se ejecute como demonio sobre la motherboard y poder permitir utilizar el editor de comandos para ver las estadísticas del radio. Para terminar el proceso se ejecuta el siguiente comando:

```
ps -A
```

este comando lista de procesos que se están ejecutando, se busca entonces iperf y el número que tiene asociado, después se escribe lo siguiente en la línea de comandos:

```
kill [numero del proceso]
```

con el primer comando el nodo seleccionado queda a la espera de que el otro punto le envíe paquetes para arrojar un reporte al final de la prueba.

Mientras tanto, el otro punto se configura como cliente mediante el comando

```
iperf -c [IP del servidor] -t [tiempo de prueba] -i [intervalo de muestra del reporte]
```

Lo que está dentro de los corchetes se cambia por lo que este dice (quitando también los corchetes)

5.3.2. Configuración de iperf para UDP. Para generar tráfico con el protocolo UDP, uno de los nodos se establece como servidor con el comando:

```
iperf -s -u -i [cada cuantos segundos muestra el reporte]
```

El otro nodo se configura como cliente como se muestra a continuación:

```
iperf -c [IP servidor] -t [duracion prueba] -i [intervalo reporte] -u -b [tasa de bits]
```

5.3.3. Interpretación de los reportes generados. Los resultados generados por la herramienta IPERF usando TCP o UDP una vez se termina una prueba se muestran así: con TCP, muestra un informe en el lado del cliente y un resumen de la prueba en el lado del servidor al finalizar la misma; con UDP se tiene un reporte para el cliente y un reporte para el servidor; el primero indica que tan rápido el cliente fue capaz de transmitir, mientras que el segundo, muestra no solo valores de tasa de transferencia efectiva, sino también valores de datagramas perdidos y de Jitter. Esto implica que para hacer un análisis completo de la información es necesario mirar ambos reportes.

5.4. Seleccionar de los sitios para establecer los enlaces e instalación de los prototipos.

El criterio principal para la selección de los sitios es que haya línea de vista entre los dos puntos; sin embargo, muchos otros factores inciden en la escogencia, tales como: la facilidad de acceso al punto, puesto que por lo general son zonas de propiedad privada es necesario tener una autorización para la instalación y permanencia del personal encargado de llevar a cabo las campañas de mediciones (los autores u otros colaboradores); facilidad para la instalación del prototipo, ya que puede haber línea de vista pero las condiciones del lugar pueden dificultar la instalación; la concurrencia y acceso de personal ajeno al proyecto, implica que el equipo no va a correr el riesgo de ser retirado del sitio, ya que las campañas de medidas pueden tomar varios días. Al final, aunque existan sitios más ideales para realizar enlaces de larga distancia con óptimas condiciones, las limitaciones mencionadas anteriormente implican que haya que realizar la campaña de medidas con condiciones poco favorables para el desempeño máximo del enlace.

5.5. Establecer la interconexión de los sistemas garantizando la estabilidad y nivel óptimo de la señal

Este paso de la metodología se aplica tanto para las pruebas de campo como de laboratorio y para cada una hay un procedimiento y elementos necesarios para llevarlo a cabo.

5.5.1. Pruebas de campo. Para realizar las pruebas de campo es necesario contar con algunos elementos básicos que facilitan la alineación de las antenas, estos elementos son:

- GPS.
- Brújula.
- Generador de Señales.
- Binoculares.
- Transportador.
- Celular o algún medio de comunicación entre los dos puntos.

Uno de los principales motivos de fracaso durante el establecimiento de un enlace, se produce por la alineación de las antenas debido a que estas son muy directivas, por ello es muy importante realizar este proceso cuidadosamente para obtener los mejores resultados.

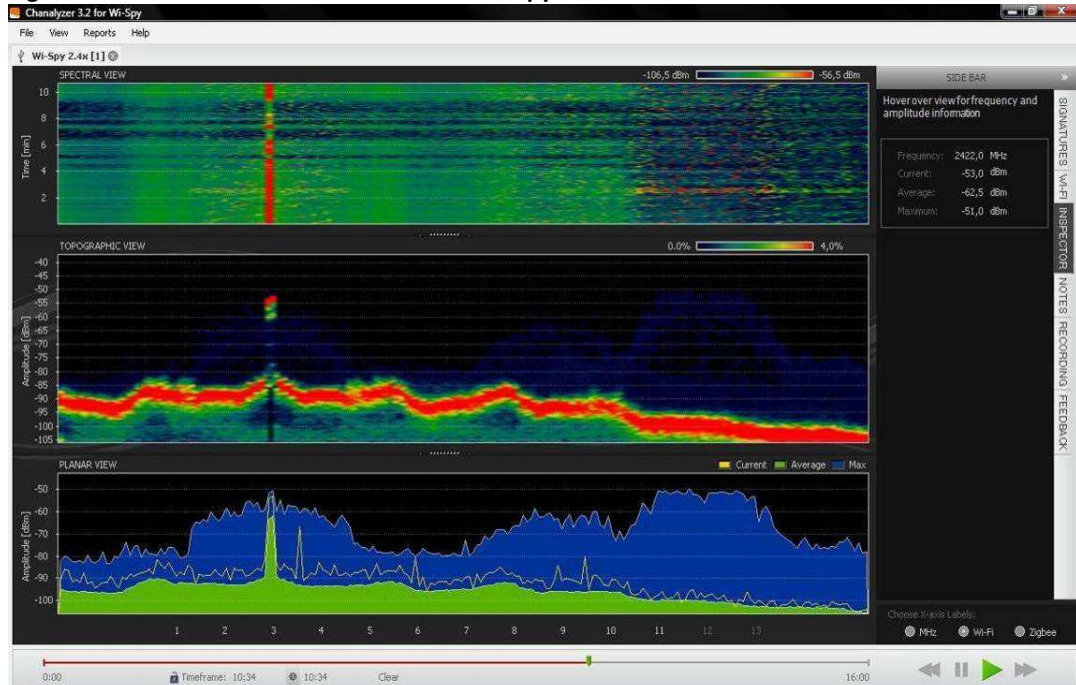
Primero, se debe usar el GPS para conocer la posición exacta de los dos puntos, los encargados antes de establecer el enlace deberán calcular el azimut y el ángulo de inclinación de la antena, algunas veces se puede utilizar los binoculares para la alineación, sin embargo no siempre se podrá determinar con claridad el punto exacto donde se encuentra el opuesto, por eso se debe usar la brújula y el transportador para conocer hacia donde se debe mover la antena. El azimut y el ángulo de elevación se pueden conocer de manera aproximada, mediante la obtención de las coordenadas de los dos puntos del enlace y luego ubicando estos puntos con el software Radio Mobile (ver capítulo 6 y anexo A para más detalles). Lo más recomendable es que en ambos nodos se realice una primera alineación usando estas técnicas.

Una vez realizado el paso anterior, se procede a conectar una de las antenas a un generador de señales mientras que en el otro nodo se mide la potencia recibida. Para este procedimiento se usó un Generador de Radio Frecuencia de marca R&S y para medir la potencia se usaba el dispositivo Wi-Spy, el cual es un analizador de espectros portable para puerto USB y el software Chanalizer, el cual maneja dicho dispositivo. En la figura 7.1 se presenta una imagen de una prueba de laboratorio usando el Wi-Spy en la cual se aprecia que el generador estaba ajustado a la frecuencia de 2.422 GHz y en el nodo receptor se medía una potencia de -53 dBm aproximadamente, la cual es suficientemente alta para establecer el enlace, pues está sobre el nivel de sensibilidad (ver capítulo 5 para más especificaciones del radio),. Mas detalles acerca de la descripción de los instrumentos de medida ver el anexo A.

El tercer paso consiste en medir la potencia recibida con el propio radio de la tarjeta principal en uno de los nodos manteniendo la antena fija, el otro nodo por el contrario debe ir moviendo la antena hasta que encuentren un punto con la máxima potencia recibida. Luego repetir el proceso anterior, pero ahora variando la antena que estaba fija y midiendo en la que se estaba moviendo. Este proceso se debe repetir hasta que ambos puntos coincidan en que la señal de potencia obtenida es la mejor.

A continuación se debe asegurar que los dos puntos puedan hacer ping entre ellos dos y luego repetir el proceso anterior, pero en vez de medir el nivel de potencia recibido, se debe lanzar una prueba de iperf para buscar el mayor throughput para el enlace.

Figura 5.3. Medición de Potencia usando el Wi-Spy.



Fuente: Software Chanalyzer para Wi-Spy

5.5.2. Pruebas de Laboratorio. La metodología para estas pruebas consiste en emular la atenuación del espacio libre tomando en cuenta la ganancia de las antenas de grilla de 24 dBi y otros factores de pérdidas como los mencionados en el capítulo 1 del marco conceptual. En otras palabras, lo que se intenta lograr es que la señal recibida por el nodo configurado como estación sea muy similar a las medidas que se obtuvieron en campo. Para este fin es que se utiliza el cable RG6, previamente caracterizado con los equipos de medida mencionados en la lista anterior; detalles acerca de dicha caracterización se pueden ver en el anexo A.

En estas pruebas se utilizaron los siguientes elementos:

- Cable RG6 marca QUEST
- Juego de conectores: Adaptadores de F hembra a Tipo N macho y/o hembra, conectores F para cable RG6 y uniones F hembra-hembra
- Analizador de espectros marca COQUITO
- Medidores de potencia marcas R&S y Keithley
- Generador de señales RF

5.5.2.1. Consideraciones y aclaraciones. En las pruebas que no tienen soporte de campo, es decir, para aquellas que superan los 10 Km., se establece un estimado de la señal recibida agregando las pérdidas adicionales tomando un punto medio de las máximas pérdidas según lo recomendado en [31]. En este artículo se recomienda usar un margen de estabilidad 20 dB una vez calculadas las máximas distancias con cada tasa de bits que permite el estándar 802.11b/g usando el modelo de espacio libre descrito con anterioridad en el capítulo 1; Sin embargo, al usar este margen (que es para el peor de los casos) se encontró que no fue posible establecer el enlace, pero con la experiencia obtenida en campo para las pruebas 650 metros, 5 Km y 10 Km se pudo comprobar que el nivel de señal obtenido en el receptor correspondía a unos pérdidas adicionales de alrededor de 6 dB; tomando en cuenta esta experiencia, la recomendación del artículo y el aumento significativo de la distancia del enlace para las pruebas de laboratorio (se hacen saltos de 10 Km hasta 50 Km) se decide usar un margen de estabilidad de 10 dB.

5.6. Reajustar tiempos de la capa MAC

Según lo estudiado en el inicio de este capítulo, se determinan los tiempos de la capa MAC (slottime y acktimeout) correspondientes a la distancia del enlace que se ha establecido. Se prueban los tiempos calculados y se hace una variación por encima y por debajo y se toma la prueba con el mejor throughput promedio para encontrar los valores de los tiempos que mejor se ajusten.

Para las pruebas de laboratorio (tomando en cuenta las consideraciones y aclaraciones de la sección anterior) se procede a calcular el nivel de señal recibida para cada distancia de los enlaces a simular y en cada caso se interconectan los radios usando tanto cable como sea necesario para obtener este nivel de señal calculado con una tolerancia de +/- 1 dBm. Lo siguiente es comprobar la conectividad entre los nodos para luego cambiar el slottime y el acktimeout como se estudió en el capítulo 1.

5.7. Generar los reportes de las pruebas (campo y/o laboratorio) y documentarlas.

Una vez establecido un enlace estable y con los tiempos de la capa MAC modificados según la distancia del enlace, se puede empezar a generar tráfico en pruebas de 180 segundos tanto para TCP como UDP. Se configura IPERF para que arroje datos de tasa de transferencia cada segundo y estos datos se guardan y procesan para generar graficas de throughput contra tiempo. La interpretación de los reportes obtenidos se explicó en la sección 5.3.3. La documentación y análisis de los resultados se presentan en el capítulo 6.

Para el caso de las pruebas de laboratorio se debe considerar que el aumento de la distancia del enlace implica que se hace más relevante el tiempo de propagación, ya que el cable emula atenuación por la pérdidas de transmisión, pero no hay forma de que emule el retardo

generado por la distancia, éste debe ser incluido haciendo un tratamiento de los datos tomados, lo cual se ha tratado con más detalle en el capítulo 1.

El producto al finalizar el conjunto de pruebas es una grafica de throughput contra distancia. Los datos puntuales obtenidos de las pruebas se superpondrán para compararlos con el modelo teórico de dicha gráfica en TCP y UDP en el estándar 802.11b/g. Estos resultados se presentarán y analizarán en el capítulo 6.

6. RESULTADOS

Este capítulo presenta las simulaciones realizadas usando el software de Radio Mobile (anexo B) que permite determinar la potencia recibida por el nodo estación, al considerar las pérdidas por propagación para enlaces bajo el estándar IEEE802.11g/b, estas simulaciones se compararán con los resultados obtenidos mediante cálculos teóricos de potencia junto con las mediciones de potencia realizadas durante las pruebas de campo. Esta comparación busca demostrar la fiabilidad de las simulaciones usando Radio Mobile y la importancia de este software para la realización de enlaces inalámbricos.

Las siguientes secciones de este capítulo mostrarán un resumen de las medidas de throughput encontradas para cada uno de los enlaces realizados en campo, junto con el resumen de los resultados encontrados en las pruebas de laboratorio para los mismos enlaces y para enlaces de hasta 50kms. Al final del capítulo se enseñarán los datos de throughput encontrados en las pruebas de campo, de laboratorio y se compararán con las medidas esperadas teóricamente para cada uno de los enlaces realizados durante este proyecto.

6.1. Descripción general y Nomenclatura de los enlaces realizados

Las pruebas de campo realizadas se llevaron a cabo realizando enlaces inalámbricos entre 9 puntos dentro de la ciudad de Bucaramanga y sus alrededores; esos puntos se presentan en la tabla 6.1 con su coordenada geográfica altura sobre el nivel del mar (no incluye la altura a la que se encuentra la antena, es decir, la altura del edificio o torre más la longitud del asta, para los casos en que se utiliza).

Tabla 6.1. De las coordenadas de los nodos instaladas en las pruebas de campo

Sitio Seleccionado	Nodo	Latitud	Longitud	Altura (m)
Edificio Centic	A	7° 8'26.09"N	73° 7'17.87"O	991
Edificio Halley	B	7° 8'21.0"N	73° 7'16.1"O	990
Edificio Capela	C	7° 7'59.81"N	73° 7'17.08"O	1000
Edificio Arapaima	D	7° 7'39.90"N	73° 7'15.80"O	998
Finca Caracol Radio	E	7° 6'14.4"N	73° 5'10.5"O	1293
Finca en Lebrija	F	7° 9'24.50"N	73° 9'43.40"O	1060
Torre ESSA	G	7° 4'55.5"N	73° 11'48.7"O	1358
Edif. Ing. Civil	H	7° 8'28.4"N	73° 7'23.1"O	975
Alto de los Padres	I	07°07'14.4"N	73°04'37.4"O	1565

Tabla 6.2. Resumen de los enlaces de campo realizado

Enlaces	Distancia (km)	Slottime (ms)		Acktimeout (ms)	IP Access Point
		11g	11b		
A-B	0.16	9	20	48	192.168.47.1
B-C	0.65	9	20	48	192.168.47.1
D-E	4.674	23	34	75	192.168.47.1
E-F	10.212	43	54	116	192.168.47.1
B-I	5.28	25	36	79	192.168.47.1
G-H	10.46	43	54	116	192.168.47.1

La tabla 6.2 muestra un resumen de los enlaces realizados utilizando la nomenclatura asignada para los nodos en la tabla 6.1, junto con su distancia y la configuración de tiempos utilizada durante el enlace.

6.2. CALCULOS DE POTENCIA DE LOS ENLACES Y SIMULACION CON RADIOMOBILE

En esta sección se pretende mostrar un proceso para el cálculo de la potencia en el nodo receptor utilizando la ecuación (1.3) explicada en el capítulo 1, con el fin de considerar de forma aproximada las pérdidas de transmisión en el espacio libre. A esto le agregamos otras consideraciones como las pérdidas por atenuación, ganancia y potencia entregada de los elementos de sistema. Lo siguiente será utilizar el software Radio Mobile (ver anexo B), el cual simula de forma aproximada las condiciones de radio propagación de la red punto a punto (PtP), por ende, se pueden predecir las pérdidas de transmisión y la señal recibida por el nodo receptor. La idea de mostrar estos dos enfoques es poder evidenciar la facilidad con que se puede hacer una predicción bastante buena de la señal recibida en el receptor sin utilizar herramientas computacionales especializadas, siempre y cuando el enlace no se haga bajo condiciones poco favorables, es decir, que los efectos mencionados en el capítulo 1 no se puedan seguir ignorando por tener una magnitud considerable dentro de las pérdidas por transmisión.

6.2.1. Cálculos de potencia en el receptor. Para obtener el balance de potencias de un radioenlace PtP, debemos considerar las pérdidas, potencias y ganancias de los elementos que lo conforman, tales como los radios, antenas, conectores, cableado, y las características del medio en que se transporta la señal. En la tabla 6.3 y 6.4 se listan las potencias y atenuaciones de los respectivos elementos del sistema WiFi de larga distancia, punto a punto.

Tabla 6.3. Potencia de transmisión del radio XR2 y ganancia de la antena de grilla

Elemento	Potencia de transmisión máxima	Ganancia
Radio XR2	-2 dB	-----
Antena de grilla	-----	24 dBi

Tabla 6.4. Atenuación de los elementos que conforman el radioenlace

Dispositivo	Atenuación (dB)
Pigtail mmcx/ufl N-Male	-0.7
LMR-400 (22.2dB/100m)	-0.44
Protector	-0.4
Conector tipo N	-0.15

A continuación se muestra un proceso de cálculo de la potencia recibida en el receptor para el radioenlace de 650 m de distancia (enlace B-C, según la nomenclatura de la tabla 6.1). Las pérdidas de transmisión que se incluyen en este proceso corresponden a las *pérdidas de transmisión básicas en el espacio libre* L_{bf} y las *Pérdida del sistema* L_s ; en cuanto a la pérdida de transmisión básica L_b , solamente se incluirán en los cálculos que hace Radio Mobile para los enlaces realizados en campo (el software incluye los efectos considerados por el modelo de Longley-Rice [23]), es por esto la diferencia que se puede ver en la tabla 6.5 para la potencia calculada y simulada con el software. En todos los casos consignados en la tabla 6.5 se considera un cable LMR-400 extensor para la antena de 2 m de longitud.

Tabla 6.5. Tabla comparativa del desempeño del enlace haciendo los cálculos descritos en la sección 6.2.1. y utilizando el software Radio Mobile

Enlace	Potencia transmisión Radio (dB)	P_r radio (dBm)	P_r Radio Mobile (dBm)
B-C	-12	-34.4	-43.6
D-E	-6	-45,5	-51.5
E-F	-2	-48,2	-59.1

6.2.1.1. Diseño de un radioenlace de 650 m de distancia (ENLACE C-B).

Potencia del Radio (P_r):	-12 dB
Atenuación Pigtail mmcx- Nmale (A_{pig}):	0.7 dB
Atenuación LMR-400:	22.2 dB/100m
Atenuación para 2 metros de cable LMR-400 (A_{LMR}):	0.44 dB
Atenuación protector descargas eléctricas (A_p):	0.4 dB máx
Atenuación conector tipo N (A_{TN}):	0.15 dB
Ganancia antena (G_i):	24 dBi

⇒ **Perdida de transmisión en el espacio libre (L_{bf}):**

Utilizando la ecuación (1.3) definida en la sección 1.3.4, tenemos:

$$L_{bf} = 32.44 + 20\log(2432) + 20\log(0.65) = 96.42 \text{ dB}$$

⇒ **P. transmitida (Pt):**

Hay que tomar en cuenta que son tres conectores tipo N (los de los extremos del cable extensor para la antena y el conector del cable de la antena)

$$P_t = G_i + P_r - A_{pig} - A_{LMR} - A_p - 3 * A_{TN} = 24 - 12 - 0.7 - 0.44 - 0.4 - 0.45 = 10.01 \text{ dB}$$

⇒ **P recibida en la antena receptora (Prant):**

$$P_t - L_{bf} = 10.01 - 96.42 = - 86.41 \text{ dB}$$

⇒ **P recibida por el radio receptor:**

$$P_{rant} + G_j - A_{pig} - A_{LMR} - A_p - 3 * A_{TN} = - 86.41 + 24 - 0.7 - 0.44 - 0.4 - 0.45 = - 64.4 \text{ dB} = -34.4 \text{ dBm}$$

6.2.2. Simulaciones con Radio Mobile A continuación se presentan los resultados de las simulaciones hechas para los enlaces realizados en las pruebas de campo. Si lector desea saber más acerca del manejo y configuración del software Radio Mobile debe dirigirse al anexo B. Primero se presentará un resumen de los parámetros configurados para cada enlace; seguidamente, se muestran capturas de pantalla de la ubicación de los nodos en los mapas de colores combinados con los mapas viales; después, se muestra la vista lateral del enlace que se está describiendo, con el fin de ver que tan libre se encuentra la zona de Fresnel. Al finalizar la descripción de todas las simulaciones la tabla 6.9 muestra un resumen de los enlaces realizados, pero a diferencia de la tabla 6.2, ésta muestra el ángulo de elevación de la antena y la altura total de la misma; además, la tabla 6.9 tiene el balance de la potencias para todos los enlaces.

6.2.2.1. Resumen de la configuración de parámetros y sistemas La tabla 6.6 presenta el modo en el que está configurado cada nodo (Maestro o esclavo) la potencia de salida del radio XR2 en dBm, la altura sobre el nivel del suelo para cada terminal (esto incluye la altura de los edificios, torres y/o la altura del asta donde se monta la antena) y la pérdida adicional por bosque o ciudad, según sea el caso.

En la tabla 6.7 se muestra un resumen de las configuraciones que son comunes para todos los enlaces, que son comunes a todos los enlaces realizados. Cabe aclarar que estos fueron los enlaces realizados en la pruebas de campo, por lo tanto las pérdidas de la línea son las correspondientes a los elementos mencionados en la tabla 6.4.

Tabla 6.6. Configuraciones que se varían en cada enlace

Enlace		Potencia del transmisor (dBm)	Altura de la antena sobre el nivel del suelo (m)		Pérdida adicional	
Maestro	Esclavo		Maestro	Esclavo	Tipo	Porcentaje
C	B	18	35	26	Ciudad	2%
D	E	24	26	1,6	Bosque	5%
F	E	28	3	1,6	Bosque	5%
B	I	24	26	2	Ciudad	1%
G	H	24	23	28	Ciudad	30%

Tabla 6.7. Resumen de la configuración de los parámetros y los sistemas

Parámetros comunes a todos los enlaces	Frecuencia min. (MHz)	2400
	Frecuencia máx. (MHz)	2485
	Polarización	Horizontal
	Método estadístico	Intento (70%)
	Refractividad de la superficie	301
	Conductividad del suelo	0,005
	Permitividad relativa del suelo	15
	Clima	Ecuatorial
Características comunes de los sistemas	Umbral del receptor	-74 dBm
	Pérdida de la línea	1,994 dB
	Ganancia de la antena	24 dBi

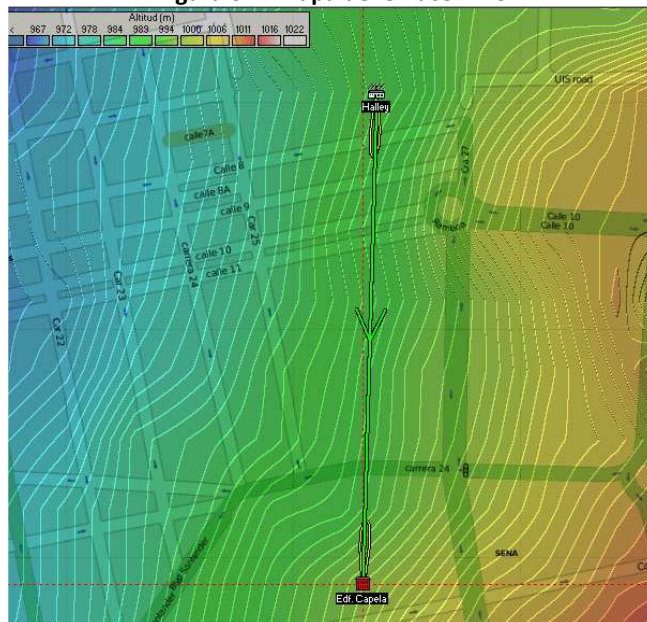
La descripción más detallada de cada enlace se describirá en las siguientes secciones los enlaces según el orden cronológico.

6.2.2.2. Enlace B-C. Este enlace tiene una distancia de alrededor de 650 m. Los radios fueron configurados para transmitir a una potencia de 18 dBm, teniéndose una potencia recibida de -43,6 dBm. Se presume que la principal influencia en las pérdidas, exceptuando las del espacio libre, son las ocasionadas por los edificios aledaños, dado que este enlace se realizó entre las placas de dos edificios de la zona urbana cercana a la universidad. Puesto que los datos de altitud obtenidos de los mapas SRTM no incluyen detalles como los edificios, Radio Mobile permite agregar pérdidas adicionales tales como las ocasionadas por la urbanización, es por eso que en la tabla 5 se ha puesto una pérdida adicional de 2% por la ciudad. El porcentaje es bajo dado que hay línea de vista entre los dos puntos. Lo anterior

también implica que el peor Fresnel no sea exactamente el muestra Radio Mobile sino ligeramente menor.

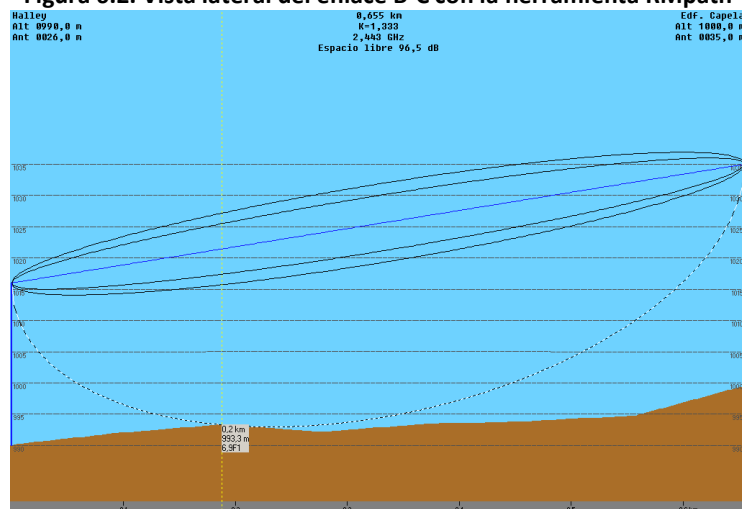
La figura 6.1 muestra la vista superior del enlace en el mapa de alturas. La figura 12 y 13 son vistas laterales mas detalladas. La figura 6.2 muestra la zona de despeje, la cual no es la verdadera debido a que no se tiene en cuenta la obstrucción por la zona urbana.

Figura 6.1. Mapa del enlace B - C



Fuente: Software Radio Mobile

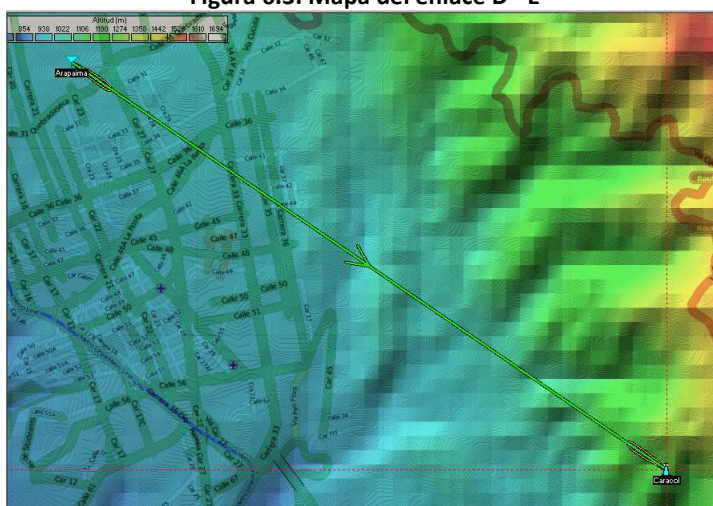
Figura 6.2. Vista lateral del enlace B-C con la herramienta RMpath



Fuente: Software Radio Mobile

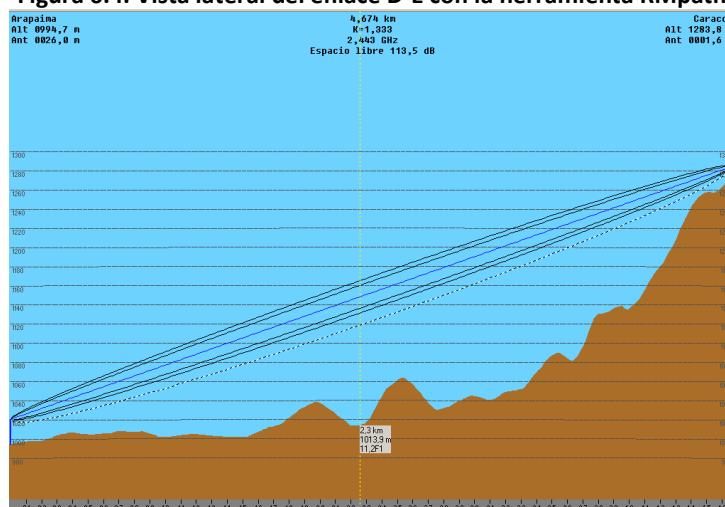
6.2.2.3. Enlace D-E Este enlace es de aproximadamente 4,7 Km. Se puede anotar que aunque la distancia es casi 8 veces mayor que en el anterior enlace, la potencia no decae notablemente, pues para compensar la mayor distancia se ha subido la potencia del radio de 18 a 24 dBm. Sin embargo, también se puede observar que en este caso hay obstáculos de vegetación y la zona de Fresnel se ve más afectada (peor Fresnel: 3.8F1). La figura 14 muestra la vista superior de este enlace en el mapa de niveles de altura. Como se puede observar en la figura 16 la zona de despeje es considerablemente menor, sumado a eso, se han agregado pérdidas por bosque de 5%. Para este enlace se ha aumentado la potencia de 18 dBm a 24 dBm para comprobar la potencia a la cual se obtiene la mejor tasa de transferencia efectiva.

Figura 6.3. Mapa del enlace D - E



Fuente: Radio Mobile

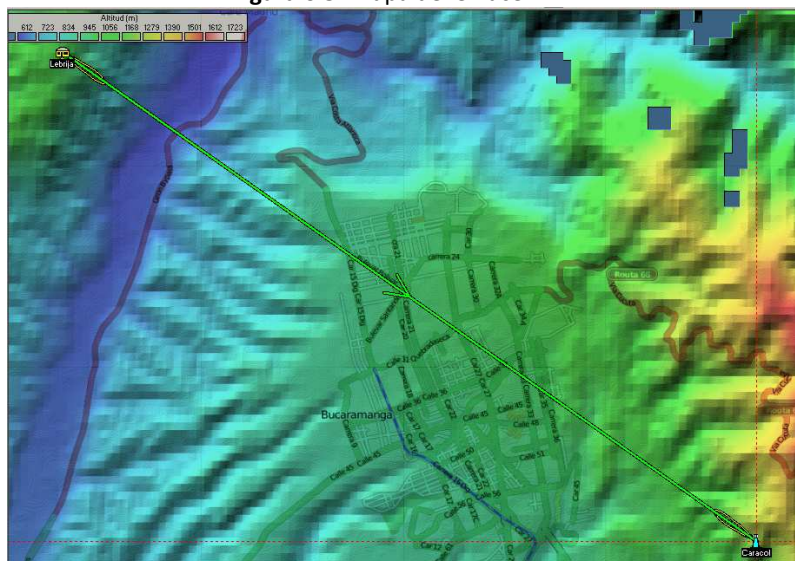
Figura 6.4. Vista lateral del enlace D-E con la herramienta Rmpath



Fuente: Radio Mobile

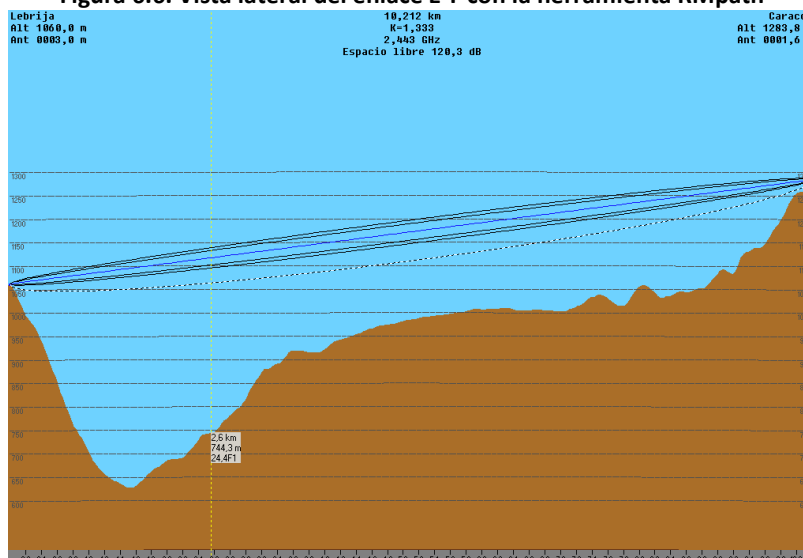
6.2.2.4. Enlace E-F Este enlace supera los 10 km, además, atraviesa la zona urbana (ver figura 6.5), pero debido a que es entre dos montañas muy altas comparadas con el nivel a que se encuentra la zona urbana no son los relevantes los efectos de reflexión, refracción o difracción (ver figura 6.6); sin embargo, la interferencia generada por la gran cantidad de redes visibles desde la coordenada del nodo E, pudiera llegar a ser un efecto considerable en la medida del throughput.

Figura 6.5. Mapa del enlace E – F



Fuente: Radio Mobile

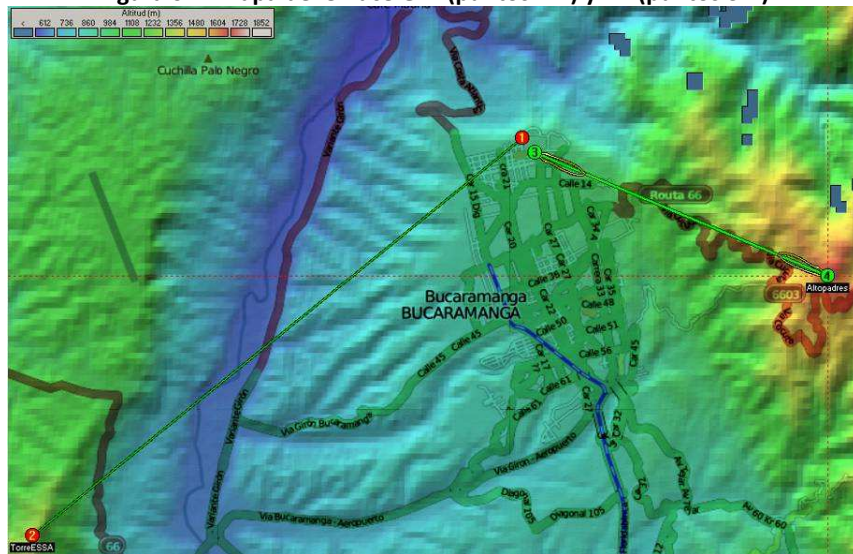
Figura 6.6. Vista lateral del enlace E-F con la herramienta RMPATH



Fuente: Radio Mobile

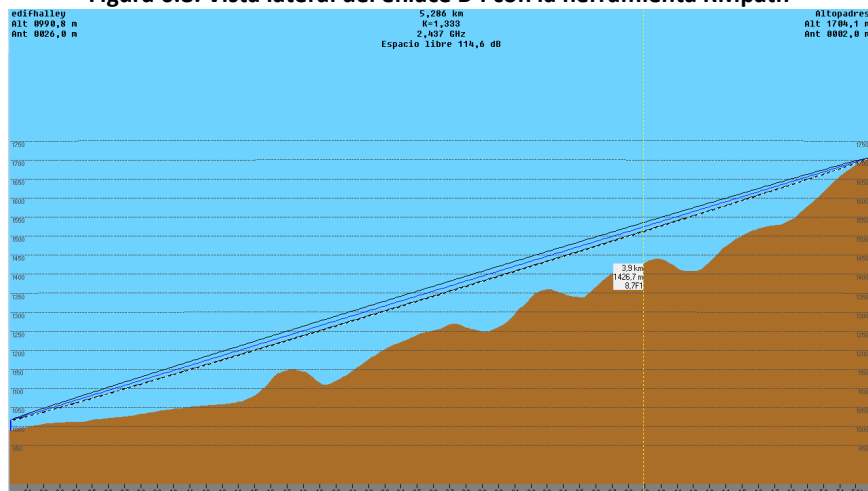
6.2.2.5. Enlace B-I Este enlace es de aproximadamente 5 Km. En la figura 6.7 está señalado entre los puntos 3 y 4. La peculiaridad de este enlace es que presenta mayor obstrucción sumado a la interferencia generada por la redes de la ciudad, pero sobre todo por el gran número de redes instaladas cerca del sitio, ya que es un sitio que generalmente es utilizado para hacer radioenlaces por tener gran visibilidad de toda la ciudad hasta la cordillera opuesta.

Figura 6.7. Mapa del enlace G-H (puntos 1-2) y B-I (puntos 3-4)



Fuente: Radio Mobile

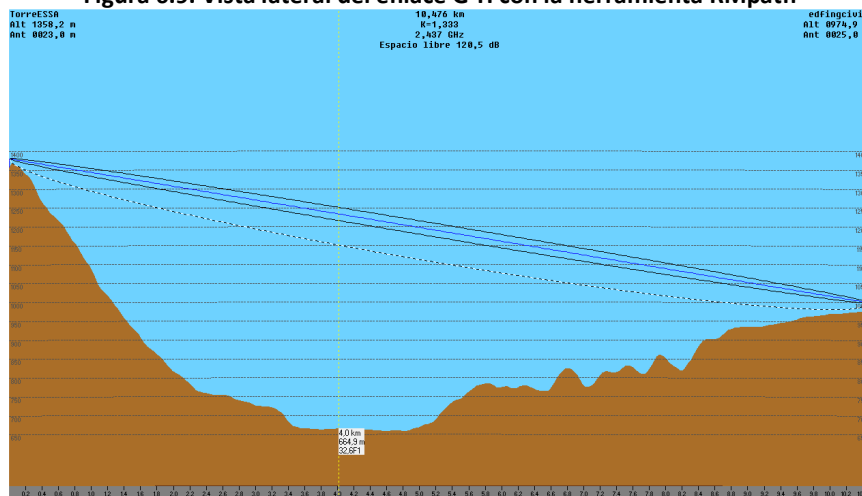
Figura 6.8. Vista lateral del enlace B-I con la herramienta RMPATH



Fuente: Radio Mobile

6.2.2.6. Enlace G-H Realizado entre edificio de la facultad de Fisico-mecánicas y una torre de la empresa de energía ESSA (coordenadas en la tabla 6.1); en la figura 6.7 corresponde a los puntos 1 y 2, respectivamente. Con una distancia de 10,46 Km es el de mayor alcance realizado, pero aún muy cercano en distancia al enlace E-F (sección 6.2.2.4). Aunque Radio Mobile nos muestre la zona de Fresnel despejada en cuanto a accidentes geográficos (ver figura 6.8), en realidad la línea de vista está obstruida por una torre vecina que además contiene diversidad de antenas de otros enlaces de comunicación (que pudiera ser un aporte en la interferencia de la señal), es por lo anterior que en la tabla 6.6 se evidencia un porcentaje importante por pérdidas adicionales asociadas a la ciudad.

Figura 6.9. Vista lateral del enlace G-H con la herramienta RMPATH



Fuente: Radio Mobile

6.2.2.7. Resumen de los resultados obtenidos en los enlaces En la tabla 6.8 se presentan las distancias de los enlaces realizados, especificando las coordenadas del maestro (AP) y esclavo (STA), además, la altura total de la antena de los respectivos nodos.

Tabla 6.8. Resumen de la ubicación de los enlaces simulados.

Enlace		Distancia (km)	Coordenadas (Latitud-Longitud)					
Maestro	Esclavo		Maestro		Altura total (m)	Esclavo		Altura total (m)
C	B	0,65	7,13328	-73,12141	1035	7,139162	-73,12124	1016
D	E	4,674	7,127707	-73,12138	1024	7,103844	-73,08656	1294,6
F	E	10,212	7,156806	-73,16206	1063	7,103844	-73,08656	1294,6
B	I	5,28	7,139162	-73,12124	1016	7,116389	-73,08194	1565
G	H	10,46	7,082083	-73,19686	1381	7,141223	-73,12309	1000

En la tabla 6.9 se muestra un resumen que compila la alineación de las antenas (azimut y ángulo de elevación), las pérdidas de transmisión por el espacio libre, algunas especificaciones de la pérdida de transmisión básica (ver sección 1.3.4), el nivel de potencia en el receptor (esclavo), el nivel del RSSI que para el caso del driver de MadWiFi es equivalente al SNR [36], y el peor Fresnel para cada caso.

Cabe aclarar que a partir de la versión 0.9.3 del controlador de MadWiFi se dejó de tomar nivel de ruido como una constante, puesto que este puede variar debido a la interferencia, la dispersión del canal, entre otros [3, 15, 37, 27, 23, 10, 28]. Generalmente es bastante aproximado usar el nivel de ruido constante recomendado de -96 dBm, pero para los casos en los que se encontró que la interferencia estaba afectando la calidad del enlace, se debe tener en cuenta la variación de la magnitud de éste.

Tabla 6.9. Resumen de las pérdidas y potencia recibida en el terminal.

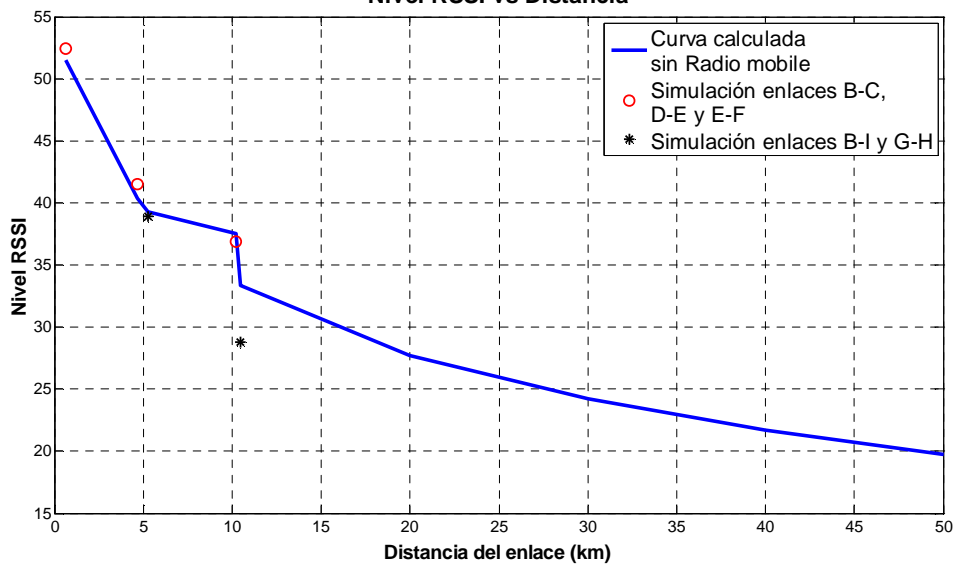
ENLACE	ALINEACIÓN DE LAS ANTENAS (°)				PÉRDIDAS (dB)						Nivel en el Receptor (dBm)	Nivel del RSSI o SNR	Peor Fresnel
	Maestro		Esclavo		Espacio Libre	Obstrucción	Urbano	Bosque	Estadísticas	Totales			
	Azim.	Elev.	Azim.	Elev.									
B-C	181,6	1,706	1,6	-1,71	96.5	1.6	1	0	6.1	105.2	-43.6	51.49	7F1
D-E	124,6	3,248	304,6	-3,29	113.6	-2.4	0	1.3	6.7	119.1	-54.5	40.35	3.8F1
E-F	125,3	1,229	305,3	-1,32	120.3	2.4	0	1.3	6.7	130.7	-59.1	39.29	3.5F1
B-I	120,3	6,254	303,3	-6,299	114,2	-1,6	1	0	8.6	122.2	-57.1	37.56	1.3F1
G-H	51,1	-2,161	231,1	2,067	135,2	-2,8	10,8	0	6.7	135.2	-67.2	33.35	4.8F1

6.2.2.8. Contraste de la curva calculada y las simulaciones con Radio Mobile. El producto final de la sección 6.2 se condensa en la grafica de la figura 6.9, en la cual se destacan 3 leyendas: la línea azul es la resultante de los cálculos explicados en la sección 6.2.1, pero adicionalmente se ha incluido el margen de estabilidad de 10 dB mencionado en capítulo 5 sección 5.3.1; los círculos corresponden a los 3 primeros enlaces (B-C, D-E y E-F); y los asteriscos a los enlaces B-I y G-H.

Los saltos irregulares que se observan entre 5 y 10 km se debe a que para el enlace D-E y B-I se pasó de usar una potencia de trasmisión de 18 a 24 dBm y para el enlace E-F se utilizó una potencia de trasmisión de 28 dBm, mientras que para el enlace G-H la máxima permitida por la regulación: 24 dBm.

Cabe aclarar que para la elaboración de la grafica en cuestión se asumió un nivel de ruido constante, cuyo valor es el mencionado en el apartado anterior, sin embargo, para los casos en los que la atenuación es considerablemente mayor que lo esperado y dadas las condiciones reales del enlace, se puede afirmar que el nivel de ruido ya no es constante y su magnitud varía debido a los efectos señalados anteriormente.

Figura 6.10. Grafica del nivel RSSI en función de la distancia del enlace PtP
Nivel RSSI vs Distancia



6.3. PRUEBAS DE CAMPO

Esta sección presenta un resumen de los resultados de las pruebas de campo realizadas tanto para TCP como para UDP bajo los estándares IEEE802.11g e IEEE802.11. Estas pruebas se hicieron usando un prototipo AP y un prototipo estación (STA) y buscaban establecer un inalámbrico estable que arrojara los valores máximos de throughput tanto para TCP, como para UDP para ambos estándares. En total se realizaron 6 enlaces de los cuales 4 fueron permitieron establecer enlaces estables tanto para el estándar IEEE802.11g como para el IEEE802.11b, los últimos dos enlaces presentaron problemas de interferencia o de obstáculos en la línea de vista impidiendo realizar las pruebas para el estándar IEEE802.11g.

6.3.1. Enlace A-B (160 metros). Para realizar las pruebas de campo se cuenta con dos prototipos (AP y STA) y se han llevado a cabo varias tomas de datos para distintos enlaces, el primero que se realizó interconectó dos de los edificios de la Universidad Industrial de Santander (U.I.S). Un nodo se ubicó en la terraza del CENTIC y el otro en la terraza del edificio de Ciencias Humanas. Este enlace de 160 metros, tenía como principal objetivo determinar el máximo rendimiento que se puede esperar, además de lograr una familiarización con los equipos que se usaron durante las pruebas de campo realizadas

posteriormente. En la figura 6.11 se muestra la ubicación del nodo en el edificio del Halley visto desde el CENTIC.

Figura 6.11. Nodo B visto desde A.

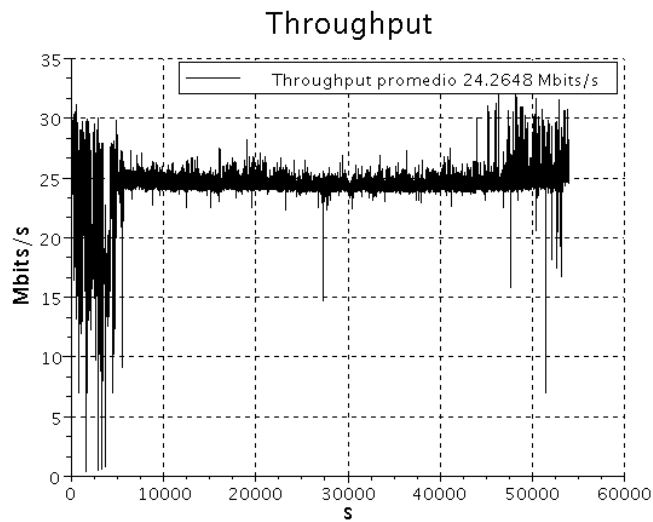


En este enlace se tomaron medidas de potencia utilizando el radio XR-2 de Ubiquiti en los dos nodos. Recordemos que la medición de la potencia recibida se hace mediante un comando que viene integrado en los controladores de MadWifi, los cuales arrojaron resultados de potencia de 41 y -40 dBm recibidos. Para analizar el desempeño, se usó una herramienta generadora de tráfico llamada Iperf, la cual permite tomar datos de throughput tanto para TCP como para UDP desde un cliente que envía paquetes hasta un servidor que los recibe. Con esta herramienta se realizaron varias pruebas variando el tiempo de duración de la mismas, con el fin de comprobar la estabilidad para periodos largos (primero unas pocas horas hasta llegar a varios días); paralelamente permitió que los estudiantes encargados del sistema de alimentación del nodo con módulos fotovoltaicos pudieran tomar medidas de rendimiento en cuanto al consumo de potencia con los nodos soportando tráfico de paquetes.

6.3.1.1 PRUEBA CON TCP. La prueba más larga con TCP duro 15 horas y generó un reporte con un tasa de transferencia promedio de 24.26 Mbits/s, en la figura 6.12 se presenta una

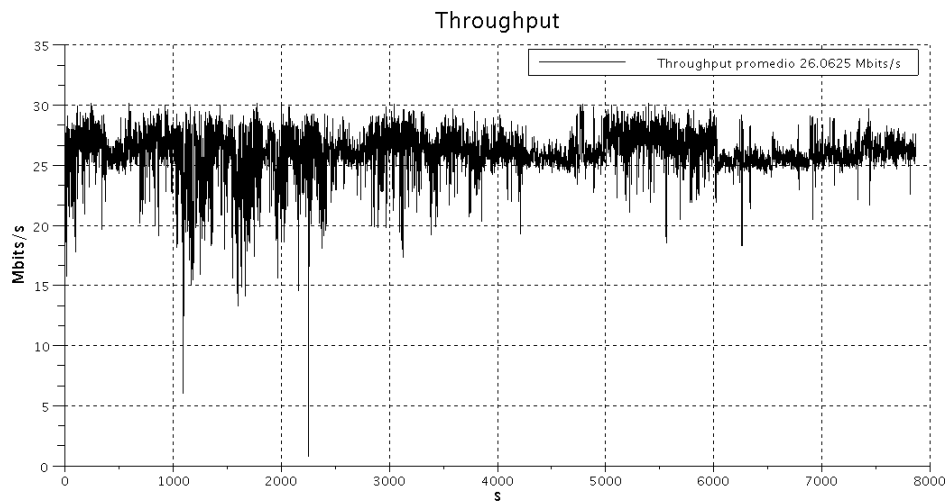
gráfica de *tasa de transferencia vs tiempo* para los datos generados bajo el estándar IEEE802.11g.

Figura 6.12. Prueba IPERF con TCP, duración: 15 horas.



La prueba con la tasa de transferencia más alta arrojo un promedio de 26 Mbits/s, en la figura 6.13 se presenta la gráfica del reporte obtenido.

Figura 6.13. Prueba con 26 Mbits/s de throughput.



En el desarrollo de las pruebas anteriores se pudo comprobar que los radios XR2 permiten tener mayor tasa de transferencia con una potencia de transmisión media y no con la potencia máxima en el caso del estándar IEEE 802.11g. Esto ocurre por el diseño de los radios que se compraron, en la tabla 6.10 se muestran las tasas de transmisión máximas teóricas que se pueden alcanzar con los radios.

Tabla 6.10. Máxima tasa de transferencia para los radios Ubiquiti Xr2.

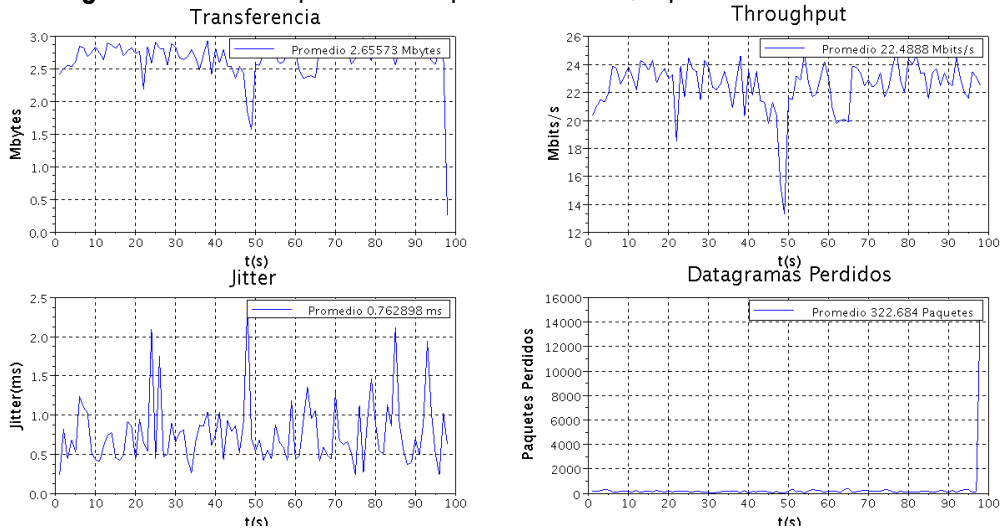
TX SPECIFICATIONS			
	DataRate	TX Power	Tolerance
802.11b	1Mbps	28 dBm	+/-1dB
	2Mbps	28 dBm	+/-1dB
	5.5Mbps	28 dBm	+/-1dB
	11Mbps	28 dBm	+/-1dB
802.11g OFDM	6Mbps	28 dBm	+/-1dB
	9Mbps	28 dBm	+/-1dB
	12Mbps	28 dBm	+/-1dB
	18Mbps	28 dBm	+/-1dB
	24Mbps	28 dBm	+/-1dB
	36Mbps	26 dBm	+/-1dB
	48Mbps	25 dBm	+/-1dB
	54Mbps	24 dBm	+/-1dB

Tomado de la Hoja de datos del fabricante de los radios XR2 [3.4].

6.3.1.2 PRUEBA CON UDP. El protocolo UDP permite ajustar la máxima tasa de transferencia a la que se transmite, este protocolo no es orientado a conexión y permite forzar el enlace a rendir al máximo para así analizar la cantidad de paquetes perdidos.

La mejor tasa de transferencia promedio que se obtuvo, vista desde el servidor, fue de 224 Mbits/s la cual se dio cuando se ajusto el ancho de banda de la prueba en 25 Mbits/s. En la figura 6.14 se presenta la gráfica del reporte que se generó. El valor más alto de transferencia fue de 2.9 Mbytes y el más bajo de 1.6 Mbytes, con un promedio de 2.68Mbytes; el valor de la tasa de transferencia más bajo fue de 13.5 Mbits/s y el mayor de 24.5 Mbits/s; en cuanto al *Jitter* el valor más bajo fue de 0.25 y el mayor de 2.45 ms; y los datagramas perdidos tuvieron un máximo de 400 y un mínimo de 0 para un promedio de 162.4 datagramas perdidos. Visto desde el lado del cliente, con ancho de banda de 25 Mbits/s, la tasa de transferencia promedio fue de 24.8 Mbits/s, mientras que el valor máximo se encontró en la prueba con ancho de banda de 35 Mbits/s, el cual arrojó un valor de 29.1Mbits/s visto desde el servidor y de 20.6 Mbits/s visto desde el cliente. Es claro que aunque el cliente intenta enviar una gran cantidad de paquetes mayor que TCP, no necesariamente todos los paquetes llegan a su destino y se presenta una alta pérdida de datagramas durante el envío de la información.

Figura 6.14. Prueba Iperf con UDP para 25 Mbits/s, reporte visto desde el servidor.



Se puede concluir que al usar este protocolo, un aumento forzado del ancho de banda va de la mano con el aumento de la cantidad de paquetes perdidos junto con el aumento del *Jitter*, lo cual genera retrasos en la recepción de los paquetes produciendo, así, más pérdidas y una menor calidad del enlace.

En la tabla 6.11 se muestra un resumen de las pruebas realizadas para este enlace, en ellas se ven varias pruebas realizadas tanto para TCP como para UDP bajo el estándar IEEE802.11g si se miran los resultados de TCP se ve que independientemente de la duración de la prueba los valores de throughput encontrados son bastante similares entre sí, de manera que se comprueba que dicha duración no afecta el comportamiento del enlace.

Tabla 6.11. Pruebas Enlace A-B.

Enlace A-B (Potencia de transmisión de los radios 18dBm). Estándar IEEE 802.11g								
Protocolo	Tiempo de duración (s)	Throughput (Mbits/s)	Servidor Iperf	Transmisión Mbytes	Jitter ms	Lost/total	Reporte iperf	
TCP	54000	24,26	Sta	No aplica	No aplica	No aplica	Cliente	
	100	24,9					Cliente	
	60	24,6					Cliente	
	100	24,8					Cliente	
	100	24,9					Cliente	
	100	26					Cliente	
	100	24,2					Cliente	
UDP	1 M	1,02		11,9	0,988	0/8504(0%)	Servidor	
	10 M	9,72		113	0,597	427/81109(0,53%)	Servidor	
	20 M	19		221	0,614	1635/159021(1%)	Servidor	
	25 M	22,5		262	0,625	15865/202670(7,8%)	Servidor	
	30 M	20,1		234	1,213	73359/240042(31%)	Servidor	
	25 M	120		24,8	No aplica	No aplica	No aplica	Cliente
	30 M	28,1		Cliente				
	35 M	29,1	Cliente					

6.3.2. Enlace B-C. (650 metros). Este enlace se realizó entre B y C. En la figura 6.15 se ve el nodo C desde la perspectiva del nodo B, este enlace, al igual que el primero, es de corta distancia y tenía como principal finalidad la familiarización con los equipos y con las herramientas a usar durante las pruebas de campo para largas distancias, además de llevar al límite de distancia para Wifi, en donde ya comienza a ser necesario la modificación de los parámetros de la capa MAC para optimizar la transferencia de datos.

Figura 6.15. Nodo C visto desde el B.



6.3.2.1 PRUEBA CON TCP. Los resultados obtenidos no variaron significativamente respecto al anterior, alcanzando una tasa de transferencia promedio de 24,8 Mbits/s. En la figura 6.16 se observa la gráfica de la prueba con la tasa de transferencia más alta para TCP.

También se realizaron pruebas para el estándar IEEE802.11b. Se alcanzó una tasa de transferencia promedio de 5,31 Mbits/s. En la figura 6.17 se presenta la gráfica de la prueba.

Figura 6.16. Prueba TCP entre B-C para el estándar IEEE802.11g

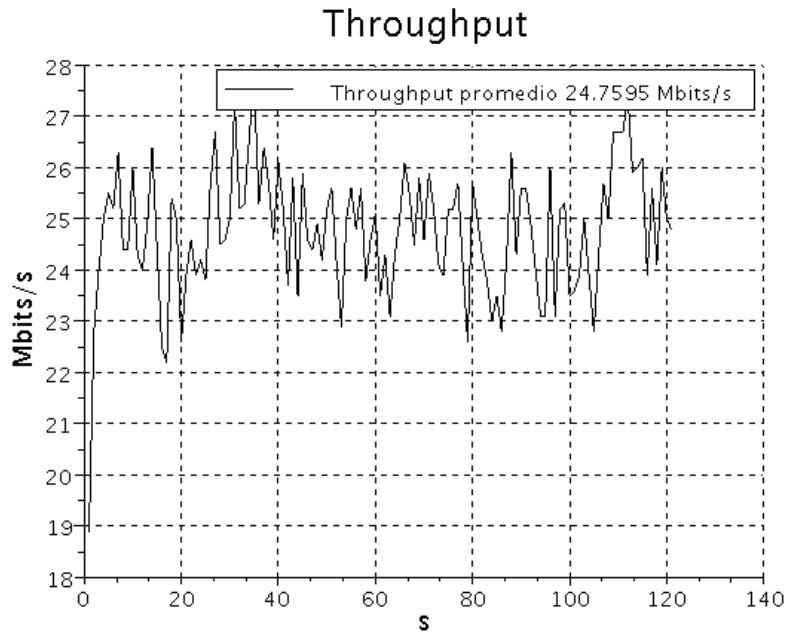
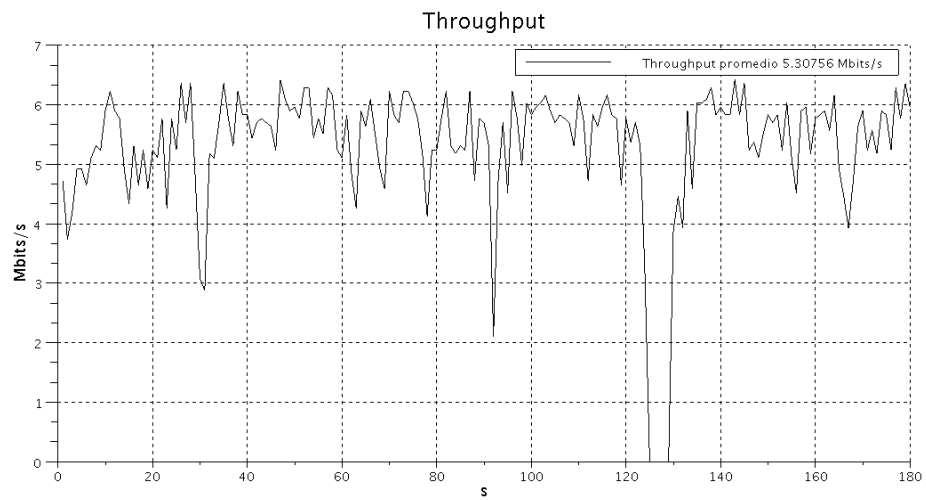
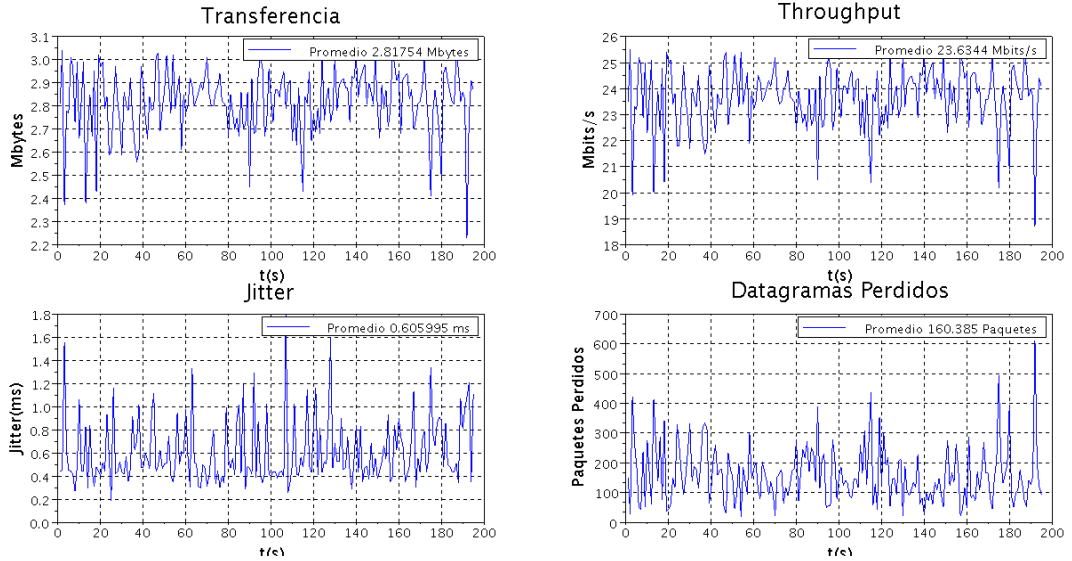


Figura 6.17. Prueba en TCP para B-C para el estándar IEEE802.11b



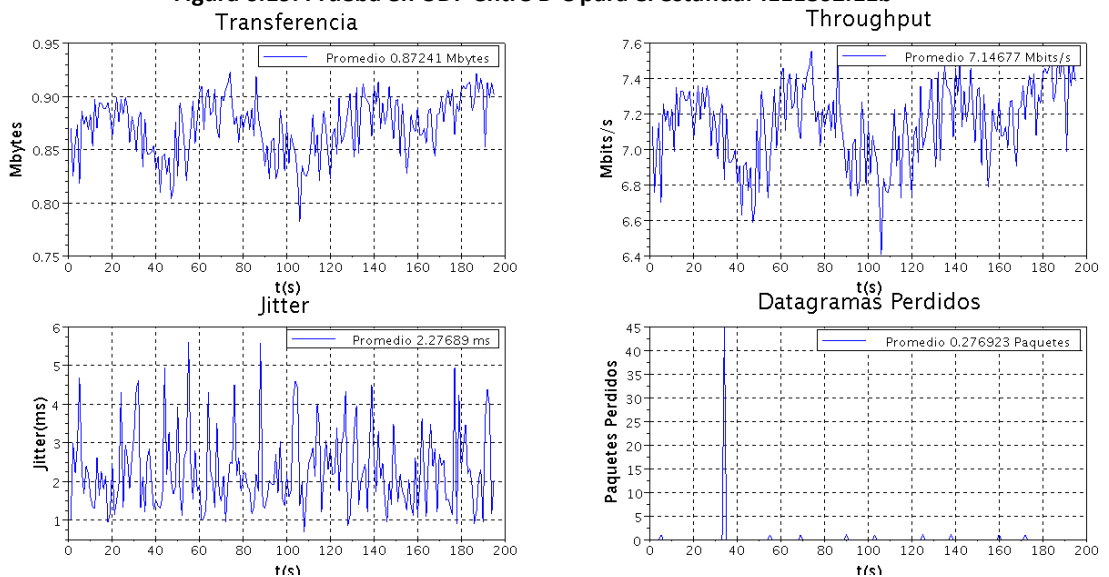
6.3.2.2 PRUEBA CON UDP. La máxima tasa de transferencia obtenida, con ancho de banda 25 Mbits/s, fue de 23,3 Mbits/s visto desde el servidor. En la figura 6.18 se presentan los resultados de la prueba, así mismo, desde el lado del cliente se obtuvo una tasa de transferencia de 23,6 Mbits/s, como máximos valores.

Figura 6.18. Prueba UDP enlace B-C para el estándar IEEE802.11g



En la prueba con el estándar IEEE802.11b. Se obtuvo una tasa de transferencia promedio de 7,1 Mbits/s visto desde el servidor. Otros detalles asociados con este resultado se presentan en la figura 6.19

Figura 6.19. Prueba en UDP entre B-C para el estándar IEEE802.11b



En la Tabla 6.12 se presenta un resumen de las pruebas realizadas. Para el enlace se realizaron varias pruebas y se encontró que cuando el AP está funcionando como cliente en iperf el valor de throughput es mayor que cuando la estación es la que se ajusta en modo cliente, por esta razón para el resto de enlaces realizados se optó por escoger siempre como Servidor en iperf al nodo estación. Esta observación se debe tener en cuenta para los estándares IEEE802.11 g/b tanto para UDP como para TCP.

Tabla 6.12. Pruebas B-C

Enlace B-C (Potencia de transmisión de los radios 18dBm)													
Protocolo	Estándar IEEE 802.11x	Tiempo de duración s	Throughput Mbits/s	Servidor Iperf	Transmisión Mbytes	Jitter ms	Lost/total	Reporte iperf					
TCP	g	120	24,8	Sta	No aplica	No aplica	No aplica	Cliente					
		200	20,4	AP				Cliente					
		120	16,4	AP				Cliente					
		200	20,4	AP				Cliente					
UDP		10M	200	9,9	AP			236	No aplica	131/130106(0,1%)	Cliente		
		20M	200	13,3	AP			318			Cliente		
		25M	200	13,5	AP			323			Cliente		
		10M	200	7,82	AP			182			2,322	131/130106(0,1%)	Servidor
		15M	200	15,4	Sta			358			0,667	0/255101 (0%)	Servidor
		20M	200	20,4	Sta			475			0,874	1095/339679 (0,32%)	Servidor
		25M	200	23,6	Sta			550			15,183	31352/423948(7,4%)	Servidor
		30M	200	20,5	Sta			477			15,782	148859/489122(30%)	Servidor
		35M	200	17,7	Sta			411			1,339	229135/522491(44%)	Servidor
		10M	200	9,89	AP			236			No aplica	No aplica	Cliente
		15M	200	11,7	AP			278					Cliente
		20M	200	13	AP			310					Cliente
25M	200	13,6	AP	323	Cliente								
TCP	180	5,2	AP	No aplica	No aplica	No aplica	Cliente						
	180	5,31	AP				Cliente						
UDP	b	5M	180	4,93	AP	106	No aplica	No aplica	Cliente				
		10M	180	6,83	AP	147			Cliente				
		5M	200	5,12	AP	119			1,791	1/85030(0,0012%)	Servidor		
		11M	200	7,15	AP	166			4,863	53/118783(0,045%)	Servidor		
		15M	200	6,99	AP	163			4,817	72/116308(0.062%)	Servidor		

6.3.3. Enlace D-E. (4.67 kilómetros). Este enlace se ubicó entre una finca que pertenece a caracol radio, ubicada en la vereda Bericute en el kilómetro 9 vía a Cúcuta, y el edificio Arapaima ubicado en la calle 22 No 24-59 del Barrio Alarcón en Bucaramanga. En la figura 6.20 se muestra el nodo ubicado en la finca de Caracol Radio con la antena apuntando hacia el otro nodo.

Este nuevo enlace ya se puede clasificar como de larga distancia, con base a que el estándar IEEE.802.11 está diseñado para cortas distancias (algunos cientos de metros), es necesario hacer modificaciones para poder mejorar su calidad y superar las limitaciones que presenta. En [30, 17] se encontró que existen tres parámetros que se ven altamente influenciados por la distancia entre los nodos en un enlace WiFi: el slottime, el acktimeout y el ctsttimeout (ver

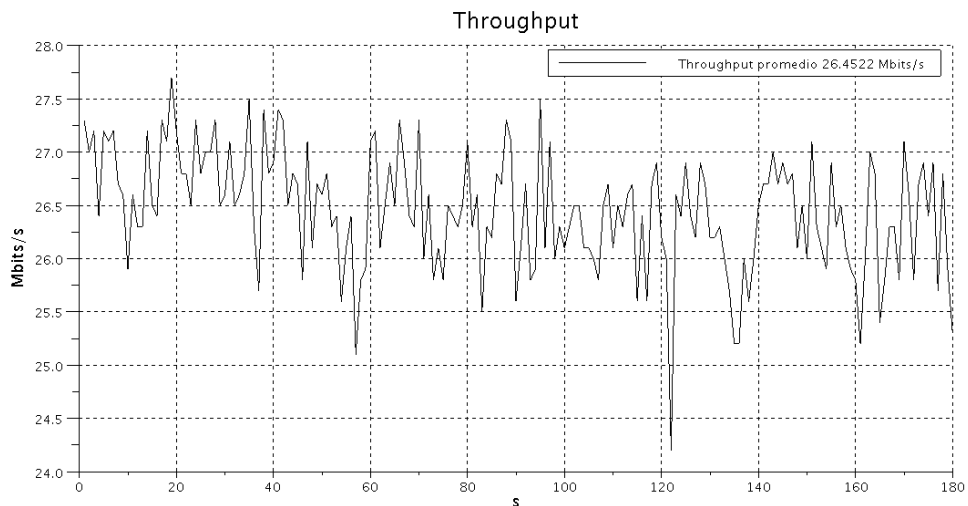
capitulo 5 para mas detalles); este último no es un parámetro que sea relevante para nuestro caso, pues es un tiempo que se configura para redes punto a multipunto.

Figura 6.20. Enlace D-E. Vista desde el punto E



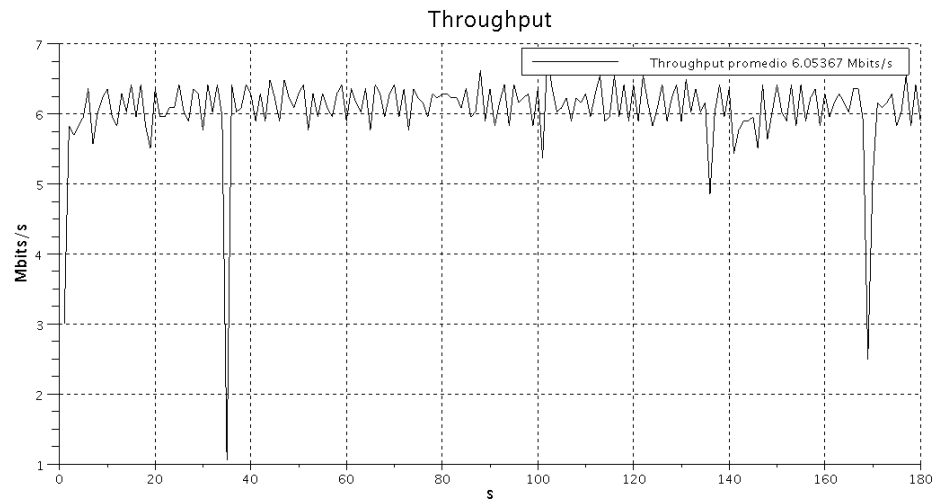
6.3.3.1 PRUEBA CON TCP. En la figura 6.21 se ven los resultados de la prueba realizada con TCP con la cual se obtuvo una tasa de transferencia promedio de 26,5 Mbits/s, sin embargo, para obtener estos datos se realizaron modificaciones en los tiempos de acktimeout y de slottime, con el fin de que el enlace no retransmita paquetes al ver que los datos se demoran en desplazarse al otro punto. Los tiempos que se ajustaron fueron de ackTimeout= 75us y de slottime= 23 us

Figura 6.21. Prueba TCP entre D-E para el estándar IEEE802.11g.



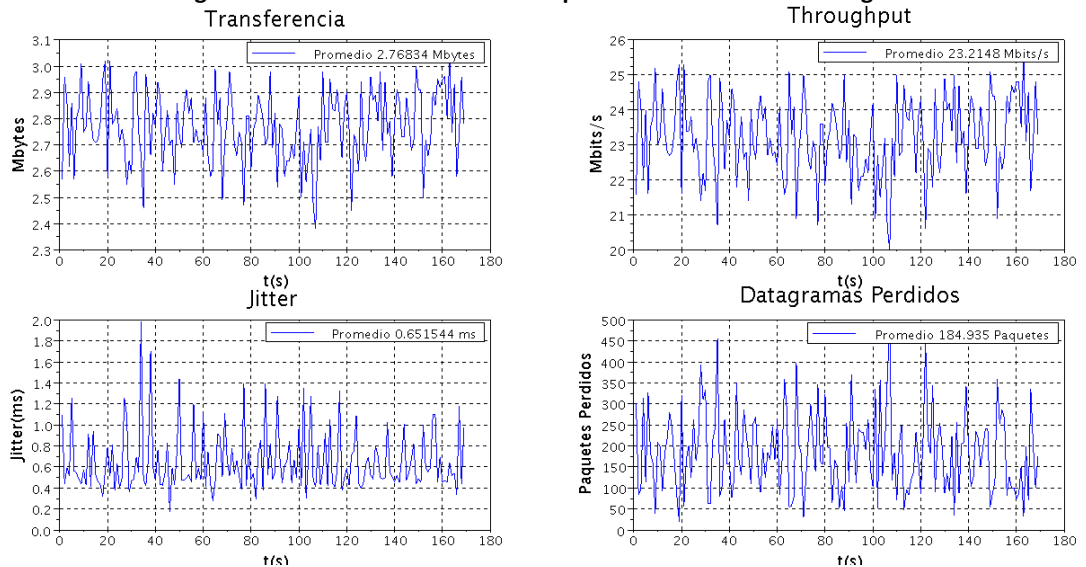
También se realizaron pruebas en el estándar IEEE.802.11b que arrojaron un promedio de 6,05 Mbits/s bajo TCP como se presenta en la figura 6.22.

Figura 6.22. Pruebas TCP entre D-E, para el estándar IEEE802.11b.



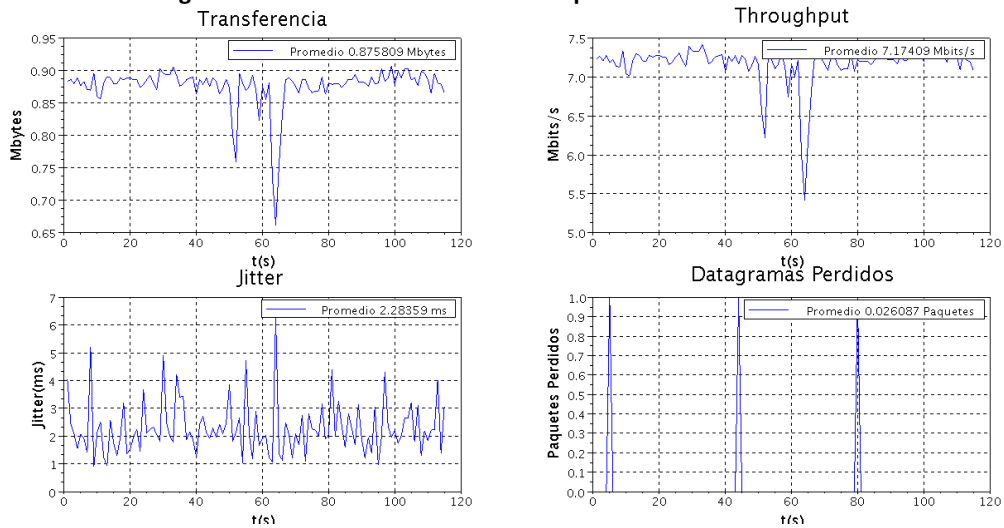
6.3.3.1 PRUEBA CON UDP. Las pruebas de UDP arrojaron un valor de 23,32 Mbits/s visto desde el servidor como se muestra en la figura 6.23. Desde el cliente la prueba arrojó una tasa de transferencia de 29,8 Mbit/s.

Figura 6.23. Prueba UDP enlace D-E para el estándar IEEE802.11g



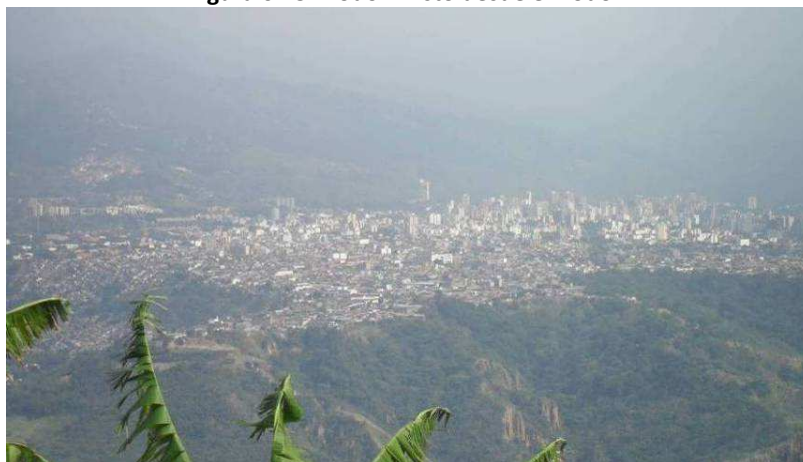
Para finalizar las pruebas para este enlace se hicieron las pruebas en UDP también para el modo 11b en las cuales se obtuvieron los resultados mostrados en la figura 6.24 cuando se miraba desde el servidor el reporte con un promedio de 7,24 Mbits/s.

Figura 6. 24. Prueba en UDP entre D-E para el estándar IEEE802.11b.



En la tabla 6.13 se presentan los resultados obtenidos con y sin variación de tiempo. Con la distancia de 4700 metros se encontró que para el estándar IEEE802.11g, al slottime por defecto que es de 9us se le deben sumar 15 us, obteniendo un slottime de 24 us, y al acktimeout se le debe sumar 30us y en el estándar IEEE802.11b se le deben sumar 11us más al slottime. Además se realizaron pruebas variando los tiempos de slottime en 1us y de acktimeout en 2us para ajustar los tiempos que mejores resultados arrojaran.

Figura 6.25. Nodo E visto desde el nodo F



6.3.4. Enlace E-F. (10.2 kilómetros). Después de finalizar estas pruebas se procedió a realizar un enlace entre la finca de caracol radio y una finca ubicada en Lebrija en la vereda la Agüada 4 kilómetros más adelante del aeropuerto Palonegro de Bucaramanga. En la figura 6.25 se presenta una foto desde la perspectiva del nodo ubicado en Lebrija, hacia el nodo ubicado en Caracol.

Haciendo un re-cálculo del slottime y el acktimeout para la nueva distancia, se obtuvo que el primero debiera ser de 42 us y el acktimeout de 114 us. Y se realizó el mismo procedimiento del enlace anterior, variando los tiempos para encontrar el valor más cercano a los tiempos calculados y con los que se obtuviera el máximo throughput.

Tabla 6.13. Pruebas D-E

Enlace D-E. Distancia= 4,700 kilómetros													
Protocolo	Estándar IEEE 802.11x	Potencia Radios	Rata	Acktimeout	Slottime	Tiempo duración	Throughput bits/s	Servidor lperf	Transmisión Mbytes	Jitter (ms)	Lost/total	Reporte lperf	
TCP	g	22 dBm	36	NC	NC	180	216 k	Sta	No aplica	No aplica	No aplica	Ciente	
		24 dBm	36	NC	NC	180	234 k	Sta				Ciente	
		22 dBm	36	NC	NC	180	203 k	AP				Ciente	
		24dB m	36	77	24	180	13,8 M	AP				Ciente	
			36	71	21	180	21,5 M	Sta				Ciente	
			36	73	22	180	22,1 M	Sta				Ciente	
			36	75	23	180	22,6 M	Sta				Ciente	
			36	77	24	180	21,9 M	Sta				Ciente	
			36	79	25	180	21,9 M	Sta				Ciente	
			54	75	23	180	26,5 M	Sta				Ciente	
			54	75	23	180	14,9 M	Sta				319	Ciente
		UDP	g	54	75	23	180	20 M				Sta	429
54	75			23	180	24,8 M	Sta	532	Ciente				
54	75			23	180	29,1 M	Sta	624	Ciente				
54	75			23	180	29,8 M	Sta	639	Ciente				
54	75			23	180	15,2 M	Sta	319	0,577	36/227609 (0,016)	Servidor		
54	75			23	180	20,4 M	Sta	428	0,713	795/305956 (0,26%)	Servidor		
54	75			23	180	23,2 M	Sta	487	14,479	32405/379571 (8,5%)	Servidor		

	30 M			54	75	23	180	20,9 M	Sta	438	14,111	133133/445316 (30%)	Servidor
	35 M			54	75	23	180	20,7 M	Sta	434	0,523	146155/455928(32%)	Servidor
TCP		b		11	75	34	180	6,07 M	Sta	130	No aplica	No aplica	Cliente
TCP		b		11	75	34	180	6,09 M	Sta	131			Cliente
TCP		b		11	75	34	180	6,05 M	AP	130			Cliente
TCP		b		11	75	34	180	5,91 M	AP	127			Cliente
UDP		b		11	75	34	180	1000 k	Sta	21,5			Cliente
UDP		b		11	75	34	180	3 M	Sta	64,4			Cliente
UDP		b		11	75	34	180	5 M	Sta	107			Cliente
UDP		b		11	75	34	180	6,93 M	Sta	149			Cliente
UDP		b		11	75	34	180	6,86 M	Sta	147			Cliente
UDP		b		11	75	34	240	6,98 M	Sta	200			Cliente
UDP		b		11	75	34	180	1,02 M	Sta	21,5 M	0,834	0/15307 (0%)	Servidor
UDP		b		11	75	34	180	3,07 M	Sta	64,4 M	1,478	0/45917(0%)	Servidor
UDP		b		11	75	34	180	5,12 M	Sta	107 M	1,401	1/76531 (0,0013%)	Servidor
UDP		b		11	75	34	180	7,02 M	Sta	147 M	5,161	4/104996 (0,0038%)	Servidor
UDP		b		11	75	34	120	7,18 M	Sta	100 M	4,774	2/71566(0,0028%)	Servidor
UDP		b		11	75	34	240	7,14 M	Sta	199 M	5,563	117/142385(0,082%)	Servidor

En la tabla 6.14 se muestra un resumen de los resultados encontrados para el enlace E-F, a diferencia del enlace D-E en este enlace no se pudieron hacer pruebas dejando los tiempos por defecto, por esta razón la tabla presenta resultados con variación de slottime y de acktimeout para cada una de las pruebas realizadas y se encontró que los valores que mejor resultado arrojaron se consiguieron para los tiempos de 34us para el slottime y de 98us para el acktimeout para el estándar IEEE802.11g, mientras que para el estándar IEEE802.11b se ajustaron los tiempos a 45 us para el slottime y el acktimeout se dejó en 98 us.

Tabla 6.14. Pruebas E-F

Enlace E-F. Distancia= 10,212 kilómetros.													
Protocolo	Estándar IEEE 802.11x	Potencia Radios	Rata	Acktimeout	Slottime	Tiempo duración	Throughput Mbits/s	Servidor lperf	Transmisión	Jitter (ms)	Lost/total	Reporte lperf	
TCP	g	28dBm	36	94	32	180	10,7	Sta	No aplica	No aplica	No aplica	Cliente	
TCP	g			96	33	180	12,1	Sta				Cliente	
TCP	g			98	34	180	12,4	Sta				Cliente	
TCP	g			98	34	180	13,2	Sta				Cliente	

TCP	g			104	37	180	11,5	Sta					Ciente
TCP	g			104	37	180	11,4	Sta					Ciente
TCP	g			114	42	180	9,33	Sta					Ciente
TCP	g			114	42	180	8,06	Sta					Ciente
TCP	g			114	42	180	12,9	Sta					Ciente
TCP	g			114	42	180	12,7	Sta					Ciente
TCP	g			114	42	180	10,8	Sta					Ciente
U D P	5M	g		98	34	180	5	Sta					Ciente
	10 M	g		98	34	180	9,39	Sta					Ciente
	15 M	g		98	34	180	12,4	Sta					Ciente
	15 M	g		98	34	180	14,1	Sta					Ciente
	20 M	g		98	34	180	16,8	Sta					Ciente
	25M	g		98	34	180	15,6	Sta					Ciente
	5 M	g		98	34	180	5,12	Sta	107	0,995		1/76498(0,0013%)	Servidor
	10 M	g		98	34	180	9,60	Sta	201	0,776		204/143707(%0,14)	Servidor
	15 M	g		98	34	180	12,6	Sta	264	1,475		1573/190109(0,83%)	Servidor
	15 M	g		98	34	180	14,4	Sta	303	1,218		71/216013(0,033%)	Servidor
20 M	g		98	34	180	17,2	Sta	359	1,364		69/256492(0,027%)	Servidor	
25 M	g		98	34	180	15,9	Sta	334	2,203		485/238459(0,2%)	Servidor	
TCP	b			98	45	180	5,73	Sta	N.A.				Ciente
U D P	7M	b		98	45	180	6,01	Sta	129				Ciente
	10 M	b		98	45	180	6,14	Sta	132		No aplica	No aplica	Ciente
	15 M	b		98	45	180	6,43	Sta	138				Ciente
	5 M	b		98	45	180	4,98	Sta	104	1,731		3/74522(0,004%)	Servidor
	10 M	b		98	45	180	6,14	Sta	129	17,640		94/92008(0,1%)	Servidor
	15 M	b		98	45	180	6,14	Sta	129	17,640		94/92008(0,1%)	Servidor
	20 M	b		98	45	180	6,58	Sta	138	4,160		10/98489(0,1%)	Servidor

En la figura 6.26 se muestran los resultados máximos obtenidos para el estándar IEEE802.11g para TCP y la figura 6.25 presenta los resultados máximos en UDP para el mismo estándar.

Figura 6.26. Prueba TCP entre E-F para el estándar IEEE802.11g.

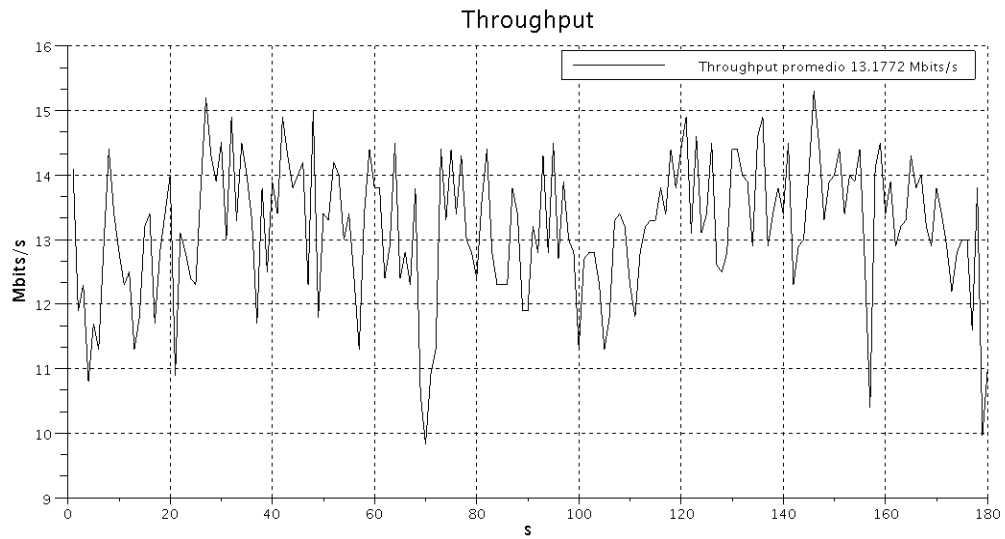
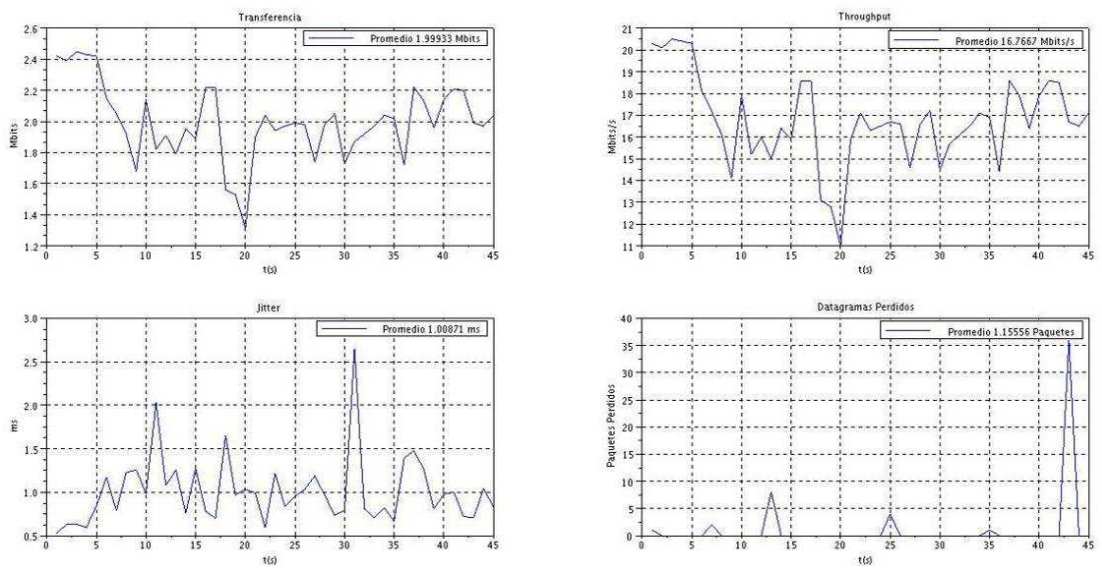


Figura 6.27. Prueba UDP enlace E-F para el estándar IEEE802.11g.



En las figuras 6.28 y 6.29 se muestran los resultados de máxima transferencia de datos para el modo 11b, en TCP y UDP respectivamente, la primera de estas graficas permite observar que el throughput promedio encontrado fue de 4.73 Mbits/s, la segunda de 6.4 Mbits/s.

Figura 6.28. Pruebas TCP entre E-F, para el estándar IEEE802.11b.

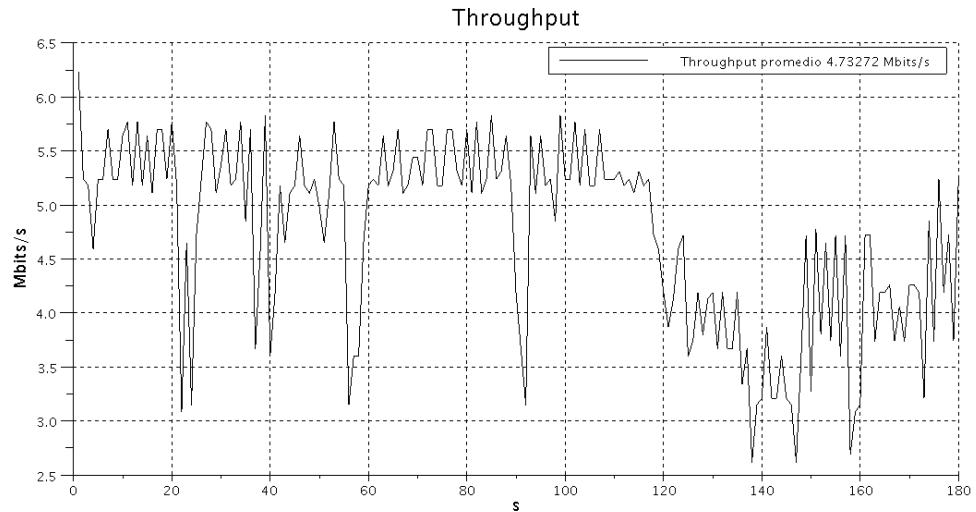
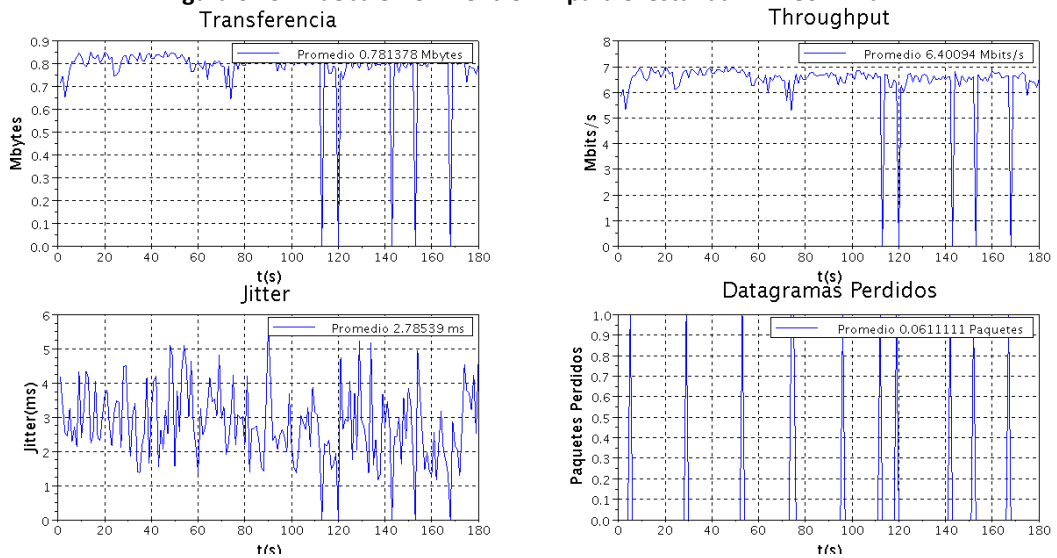


Figura 6.29. Prueba en UDP entre E-F para el estándar IEEE802.11b.



6.3.4. Enlace B-I (5.01 kilómetros). El siguiente enlace realizado cubría una distancia de 5 kilómetros lo cual lo hacía comparable con el enlace D-E, sin embargo debido a problemas de interferencia con enlaces ya establecidos en el Alto de los padres no fue posible establecer un enlace estable usando el estándar IEEE802.11g por esta razón solo se realizaron pruebas con iperf para el estándar IEEE802.11b, en la tabla 6.15 se presenta un resumen de las pruebas efectuadas y de los resultados obtenidos en las mismas, se realizaron 5 pruebas.

Tabla 6.15. Pruebas B-I

Enlace B – I. Distancia= 5.01 kilómetros																
Protocolo	Estándar IEEE 802.11x	Potencia Radios	Rata	Acktimeout	Slottime	Tiempo Duración	Throughput Mbits/s	Iperf Servidor	Transmisión Mbytes	Jitter (ms)	Lost/total	Reporte iperf				
TCP	b	14dBm	11M		43	100	5.21	Sta	No aplica	No aplica	No aplica	Cliente				
							5.6					Cliente				
UDP							4M					3.74	Cliente			
							7M					4.97	Cliente			
							10M					3.45	Cliente			
							10M					3.16	Cliente			
							4M					2.1	25.7	5.422	367/18681(2%)	Servidor
							7M					4.48	54.8	5.831	1550/40624(3.8%)	Servidor
							10M					2.31	28.2	3.112	1268/21399(5.9%)	Servidor
							10M					2.24	27.3	13.789	41/1440(2.8%)	Servidor

6.3.5. Enlace G-H. Este enlace, realizado entre el edificio de civil de la U.I.S y una torre de la electrificadora de Santander (ESSA) ubicada en Lebrija, cubría una distancia de 10,46 kilómetros y pretendía realizar una comparación con el enlace E-F, sin embargo a la hora de realizar las pruebas, se encontró una torre como obstáculo impidiendo tener una línea de vista despejada. Este problema impidió establecer un enlace en el estándar IEEE802.11g, sin embargo en la tabla 6.16 se presentan resultados para las pruebas bajo el estándar IEEE802.11b, debido a que la dificultad que representa realizar las pruebas en una torre y a la hora de finalización de las pruebas, se optó por realizar solo 3 pruebas que son las consignadas en la tabla. En la figura 6.30 además se presenta una foto que muestra el obstáculo en la línea de vista.

Tabla 6.16. Pruebas G-H

Enlace G-H. Distancia= 10.46 kilómetros																
Protocolo	Estándar IEEE 802.11x	Potencia Radios	Rata	Acktimeout	Slottime	Tiempo Duración	Throughput Mbits/s	Iperf Servidor	Transmisión Mbytes	Jitter (ms)	Lost/total	Reporte iperf				
TCP	b	14dBm	11M	116	54	180	5.2	Sta	No aplica	No aplica	No aplica	Cliente				
							5					Cliente				
UDP							7M					6.07	Cliente			
							5M					5.12	107	1.716	1/76531(0.0013%)	Servidor
							7M					6.21	130	2.631	6/92872(0.0065%)	Servidor

Figura 6. 30. Obstáculo en la línea de vista para el enlace G-H



6.4. Pruebas de Laboratorio

Las pruebas de laboratorio realizadas para este proyecto tenían como principal objetivo comparar los resultados obtenidos en las pruebas de campo, con los resultados de los enlaces hechos en laboratorio, mediante una atenuación que simulaba las pérdidas de potencia causadas por radiopropagación. Para ello se utilizó un cable de marca Quest con referencia QCC RG6 con el que se contaba en el grupo de investigación, el mayor inconveniente que se tuvo fue que, debido a la falta de la hoja de datos del fabricante del cable, no se sabía con certeza la atenuación que se obtenía por cada metro de cable, por esta razón se realizaron pruebas con un generador de señales y dos medidores de potencia que permitieran encontrar la atenuación de un metro de cable en las frecuencias usadas por el estándar IEEE802.11b/g. Los resultados obtenidos arrojaron que un metro de cable atenúa 0.6 dB aproximadamente (ver anexo A).

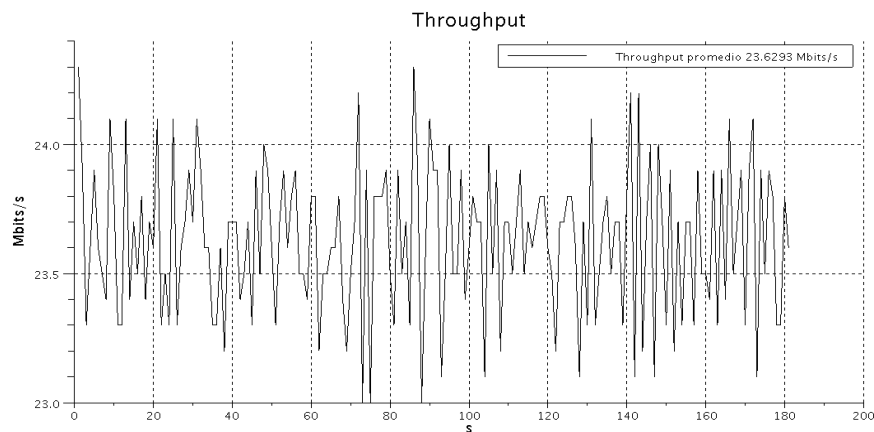
El siguiente paso consistió en calcular la cantidad de cable necesaria para simular las pérdidas de transmisión totales obtenidas en las pruebas de campo, una vez obtenidas esas simulaciones se realizaron los enlaces B-C; D-E y E-F. En los dos últimos se realizó la misma variación de los valores de slottime y de acktimeout usados en campo.

Se debe tener en cuenta que la utilización del cable es para emular la atenuación debida a las pérdidas por transmisión, sin embargo este medio no puede emular el retardo debido a la distancia entre los nodos (tiempo de propagación). En [26] se explica con más detalle la

aplicación de una de serie de ecuaciones que tienen como fin agregar el efecto de la distancia en los tiempos de propagación de los paquetes transmitidos una vez se han tomado las respectivas medidas del enlace establecido en la prueba de laboratorio.

6.4.1 Enlace B-C. Este enlace por ser el de menor distancia es considerado como un enlace de pruebas locales, debido a la cercanía de los nodos durante las pruebas de campo no fue necesario variar ninguno de los parámetros de tiempo. En las pruebas de laboratorio se repitieron las condiciones de potencia de transmisión y de señal recibida por el cliente. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 6.16 donde se observa que se realizaron pruebas todas de 180 segundos al igual que se hizo para la mayoría de pruebas de campo con el fin de mantener un tiempo de prueba estándar tanto para las pruebas de campo como de laboratorio, sin embargo debido a que se conocía con antelación los resultados esperados para estas pruebas se realizaron solo las pruebas necesarias para obtener un punto de comparación con las pruebas de campo para este mismo enlace.

Figura 6.31. Resultado en TCP para el estándar IEEE802.11g en laboratorio. Enlace B-C



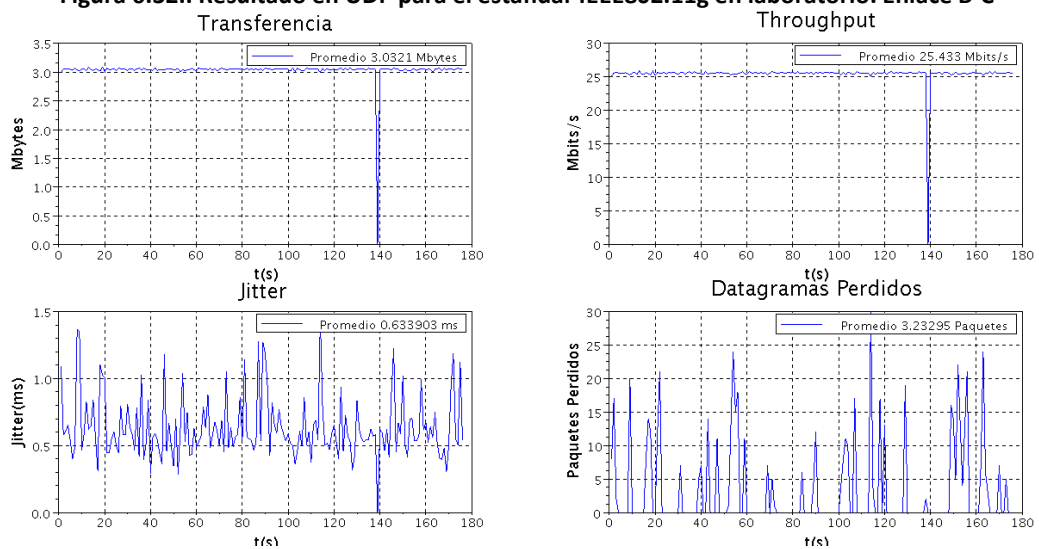
A su vez la figura 6.31 muestra la gráfica realizada para la prueba que arrojó el máximo valor de throughput para el estándar IEEE802.11g, la figura 6.32 muestra la gráfica de los resultados obtenidos para el máximo valor de throughput en la pruebas de UDP para el mismo estándar.

Tabla 6. 17. Pruebas de laboratorio para B-C

Enlace B-C (Potencia de transmisión de los radios 18dBm)									
Protocolo		Estándar IEEE 802.11x	Tiempo de duración s	Throughput Mbits/s	Servidor Iperf	Transmisión Mbytes	Jitter ms	Lost/total	Reporte iperf
TCP		G	180	23.6	Sta	No aplica	No aplica	No aplica	Cliente
UDP	20M			20					Cliente

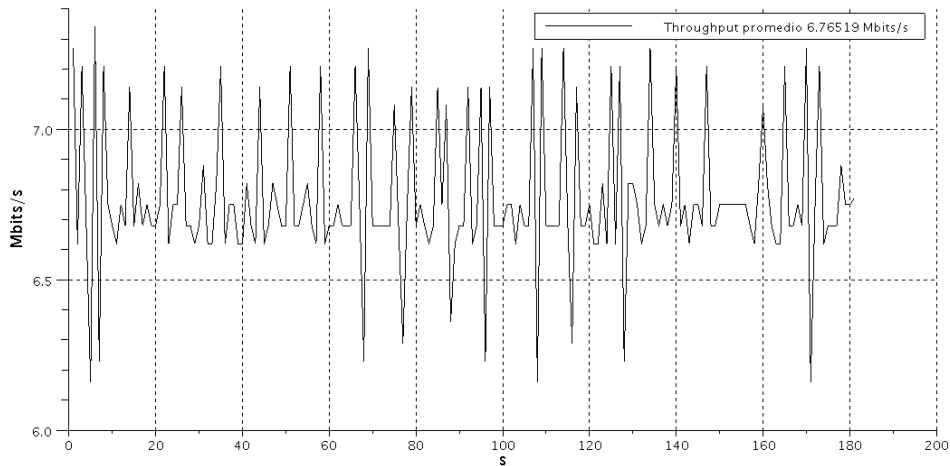
	25M	B	25	429	0.533	1/306110 (0.00033%)	Cliente
	30M		27.7				Cliente
	20M		20.5				Servidor
	25M		25.6				Servidor
	30M		25.1				Servidor
TCP			6.77	No aplica	No aplica	No aplica	Cliente
UDP	5M		5				Cliente
	7M		7				Cliente
	11M		7.6				Cliente
	5M		5.12				Servidor
	7M		7.17	Servidor			
	11M		7.78	163	0.969	58/116365 (0.05%)	Servidor

Figura 6.32.. Resultado en UDP para el estándar IEEE802.11g en laboratorio. Enlace B-C



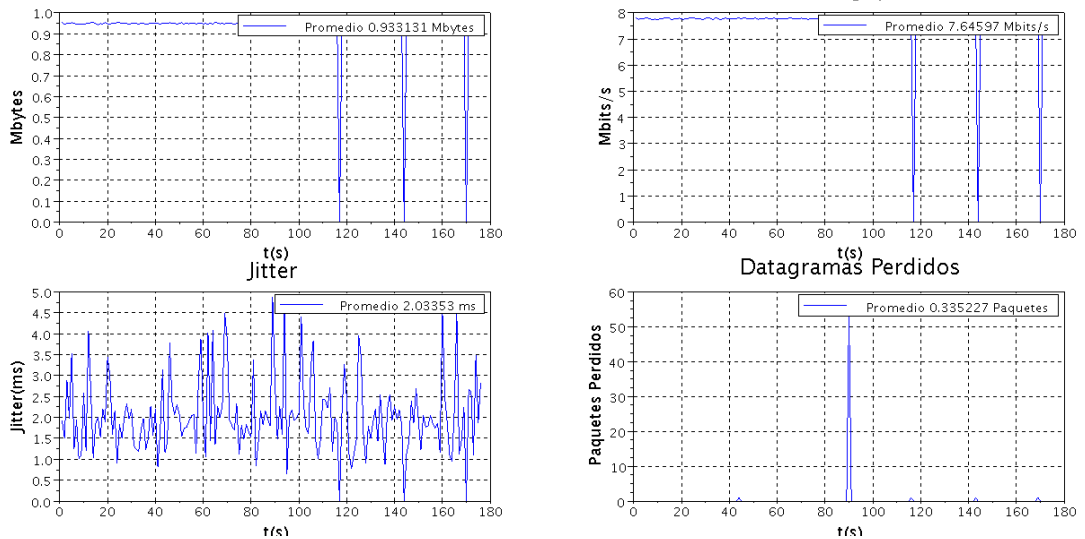
La figura 6.33 presenta los resultados para el estándar IEEE802.11b de la prueba que arrojó el mayor valor de throughput promedio, este valor fue de 6.76 Mbits/s

Figura 6.33. Resultado en TCP para el estándar IEEE802.11b en laboratorio. Enlace B-C
Throughput



La figura 6.34 enseña los datos obtenidos en la prueba de UDP para el estándar IEEE802.11b, con los valores de throughput, transferencia, jitter y datagramas perdidos.

Figura 6.34. Resultado en UDP para el estándar IEEE802.11b en laboratorio. Enlace B-C
Transferencia Throughput



6.4.2 Enlace D-E. Este enlace presenta una variación en los valores de acktimeout y slottime, debido a que la distancia obtenida era de 4,67 km. Se realizó el mismo procedimiento que para la prueba de laboratorio anterior agregando más cable al que ya se tenía y obteniendo de esta manera el nivel de recepción que se esperaba en la estación. En la tabla 6.18 se muestra un resumen con los resultados y la configuración usada para simular el enlace donde se ve que los valores de acktimeout y de slottime fueron 75 y 23 us

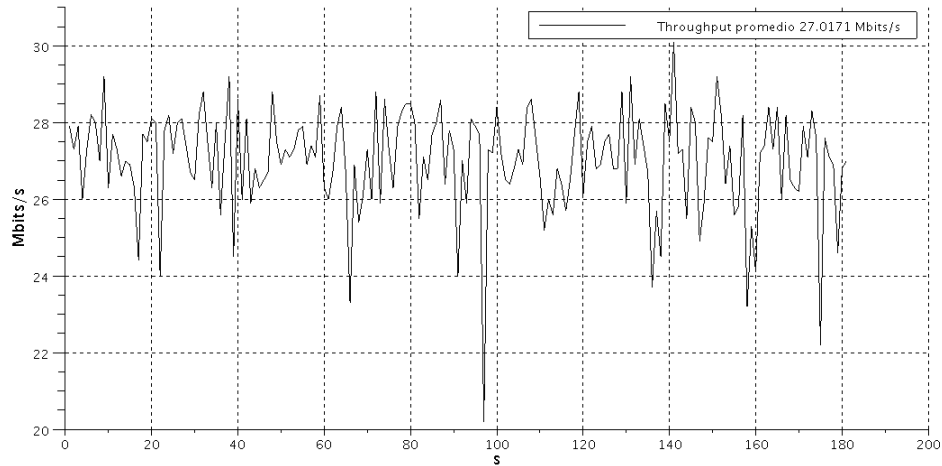
respectivamente para el estándar IEEE802.11g y se varió el slottime para el estándar IEEE802.11b a 34us para este enlace se realizaron 6 pruebas para cada uno de los estándares.

Tabla 6.18. Pruebas de laboratorio para D-E.

Enlace D-E . Distancia= 4,700 kilómetros															
Protocolo	Estándar IEEE 802.11x	Potencia Radios	Rata	Acktimeout	Slottime	Tiempo Duracion	Throughput Mbits/s	Iperf Servidor	Transmisión Mbytes	Jitter (ms)	Lost/total	Reporte iperff			
TCP	g	24 dBm	54M	75	23	180	26	Sta	No aplica	No aplica	No aplica	Ciente			
							27					Ciente			
15M							15					Ciente			
20M							20					Ciente			
25M							25					Ciente			
30M							29.7					Ciente			
35M							33.5					Ciente			
15M							15.4					322	0.611	27/229577 (0.012%)	Servidor
20M							20.2					424	0.76	3459/306004 (1.1%)	Servidor
25M							23.6					494	0.44	29685/382179 (7.8%)	Servidor
30M	21.7	454	0.498	130459/454372 (29%)	Servidor										
TCP	b	24 dBm	11M	34	180	6.09	Sta	No aplica	No aplica	No aplica	Ciente				
1 M						1					Ciente				
3 M						3					Ciente				
5 M						5					Ciente				
7 M						6.98					Ciente				
11 M						7					Ciente				
1M						1.02					21.5	0.451	0/15307 (0%)	Servidor	
3M						3.07					64.4	1.342	0/45917 (0%)	Servidor	
5M						5.12					107	1.512	1/76529 (0.0013%)	Servidor	
7M						7.15					150	4.751	4/106842 (0.0037%)	Servidor	
11M	7.17	150	4.801	4/107146 (0.0037)	Servidor										

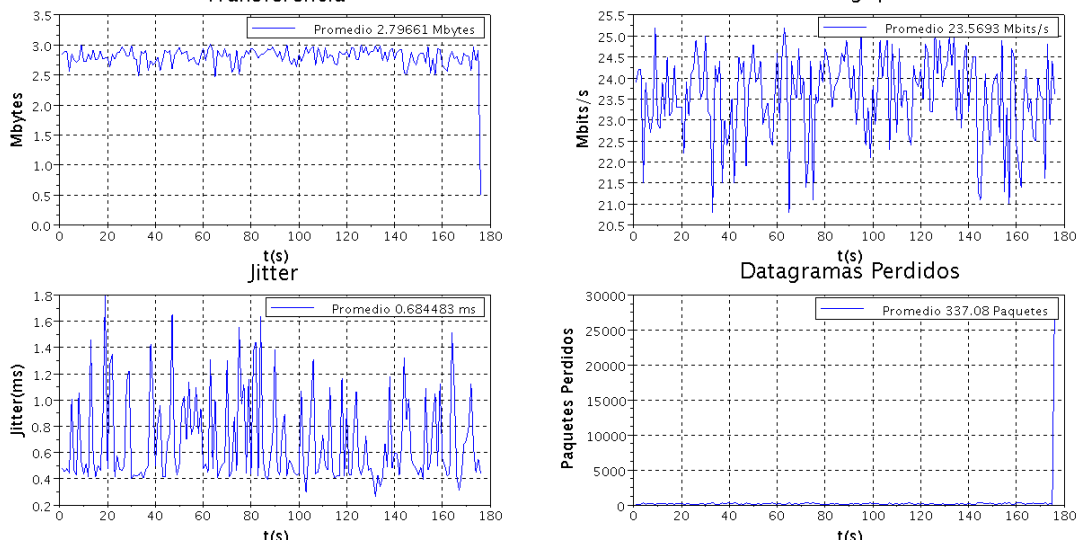
Además la figura 6.35 presenta la gráfica hecha para la prueba de máximo throughput obtenido en el estándar IEEE802.11g para este enlace, que arrojó un promedio de 27.01 Mbits/s.

Figura 6.35. Resultado en TCP para el estándar IEEE802.11g en laboratorio. Enlace D-E
Throughput



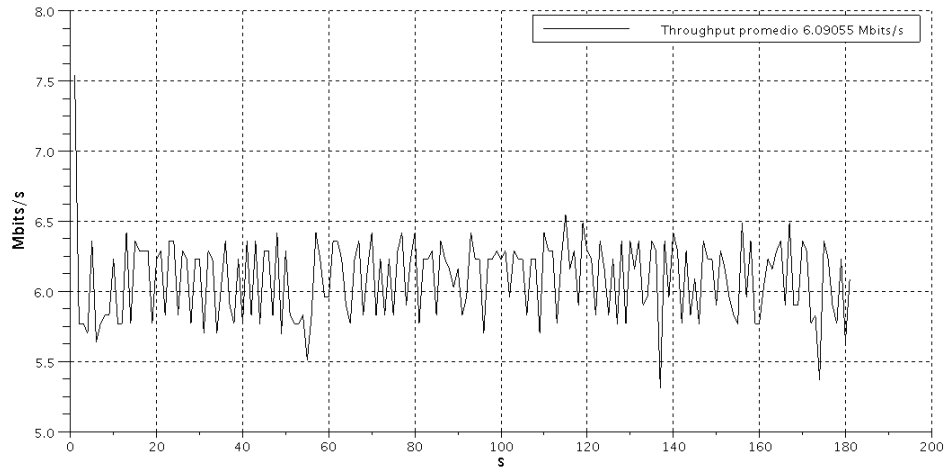
La figura 6.36 representa los datos obtenidos para la prueba que entregó el valor máximo de throughput para este enlace bajo el estándar IEEE802.11g. Esta prueba arrojó un valor de throughput promedio de 23.56 bits/s.

Figura 6.36. Resultado en UDP para el estándar IEEE802.11g en laboratorio. Enlace D-E
Transferencia Throughput



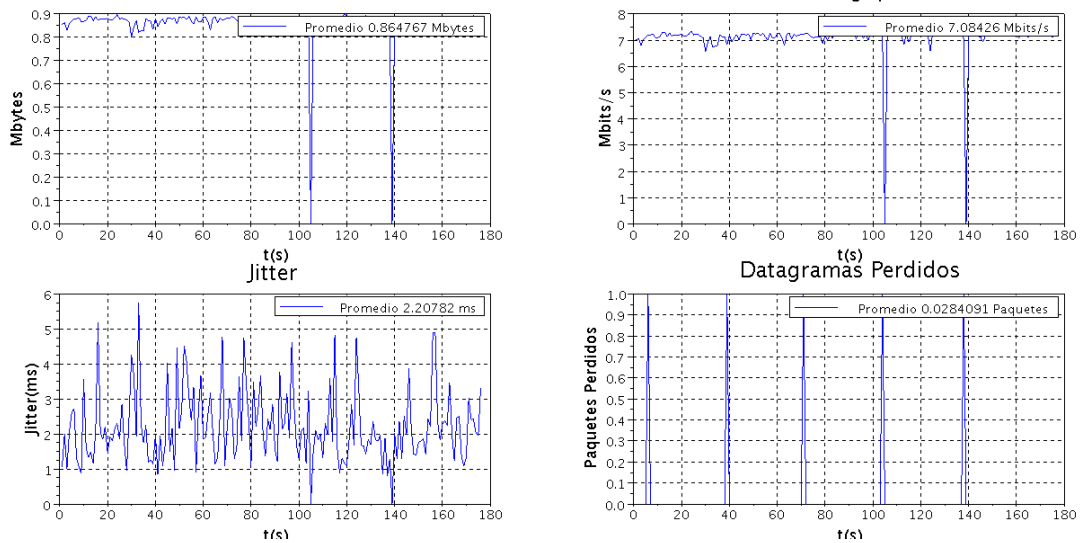
La figura 6.37 muestra el resultado de la prueba que enseñó el mejor throughput bajo el estándar IEEE802.11b en donde se ve que el valor promedio obtenido al final fue de 6.09 Mbits/s.

Figura 6. 37. Resultado en TCP para el estándar IEEE802.11b en laboratorio. Enlace D-E
Throughput



La última gráfica realizada para este enlace permite observar los resultados encontrados para la prueba de mayor throughput en UDP bajo el estándar IEEE802.11b. El promedio obtenido fue de 7.08Mbits/s. el resultado se ve en la figura 6.38.

Figura 6.38. Resultado en UDP para el estándar IEEE802.11b en laboratorio. Enlace D-E
Transferencia Throughput



6.4.3 Enlace E-F. Este enlace también requiere una variación en los valores de acktimeout y slottime, debido a que la distancia obtenida era de 10.212km. Se realizó el mismo procedimiento que para el anterior enlace agregando más cable al que ya se tenía y obteniendo de esta manera el nivel de recepción que se esperaba en la estación. Como se pudo observar en los resultados mostrados anteriormente de las pruebas de campo y de laboratorio, es claro que la tendencia en las gráficas no varía significativamente, los valores

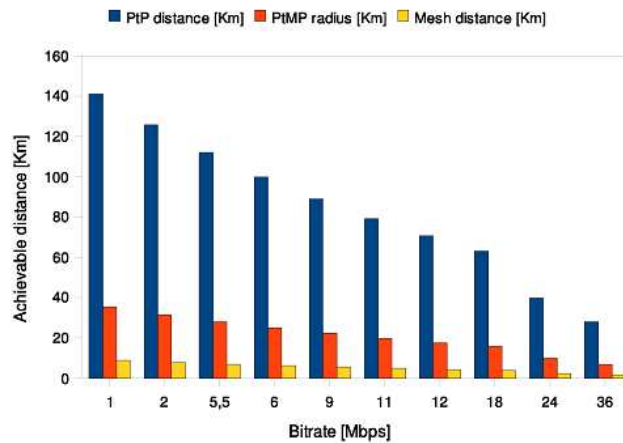
máximos de throughput obtenidos en las pruebas bajo el estándar IEEE802.11g son de 19.05Mbps/s para TCP y de 21.74 Mbps/s para UDP; mientras que para el estándar IEEE802.11b los valores máximos de throughput fueron 5.61Mbps/s para TCP y 6.65 Mbps/s para UDP. En la tabla 6.19 se muestra un resumen con los resultados y la configuración usada para simular el enlace E-F en donde se observa que se realizaron 4 pruebas para el estándar IEEE802.11g y 5 para el estándar IEEE802.11b.

Tabla 6.19. Pruebas de laboratorio para E-F.

Enlace E-F. Distancia= 10.212 kilómetros															
Protocolo	Estándar IEEE 802.11x	Potencia Radios	Rata	Acktimeout	Slottime	Tiempo Duración	Throughput Mbits/s	Iperf Servidor	Transmisión Mbytes	Jitter (ms)	Lost/total	Reporte iperf			
TCP	g	28 dBm	36M	116	43	180	18.9	Sta	No aplica	No aplica	No aplica	Cliente			
							18.49	Sta					Cliente		
19.05							Sta	Cliente							
13.79							Sta	Cliente							
17.91							Sta	Cliente							
21.74							Sta	Cliente							
UDP							15M	14.13	Sta	322	0.452	4/229543 (0.0017)	Servidor		
							20M	18.23	Sta	428	0.403	356/305663 (0.12%)	Servidor		
							25M	20.66	Sta	492	0.413	29672/380763 (7.8%)	Servidor		
							15M	5.61	Sta	No aplica	No aplica	No aplica	Cliente		
20M	2.95	Sta	Cliente												
25M	4.86	Sta	Cliente												
TCP	b	11M	54	54	180	6.51	Sta	No aplica	No aplica				No aplica	Cliente	
						6.51	Sta								Cliente
						3.02	Sta			64.4	1.493	1/45919 (0.0022%)			Servidor
						5M	4.97			Sta	107	1.527			1/76531 (0.0013%)
7M						6.64	Sta			145	3.27	48/103425 (0.046%)			Servidor
UDP						3M	6.65	Sta	145	4.657	3/103560 (0.0029)	Servidor			
						5M									
						11M									

6.4.4 Enlace 20 km. Aunque el propósito de las pruebas de laboratorio consistía en tener un punto de comparación con las pruebas de campo, se decidió complementar la sección de pruebas de laboratorio con enlaces de 20, 30, 40 y 50 km. Esto con el fin de enriquecer los resultados obtenidos en este proyecto. En la figura 6.39 se muestra la relación entre distancia y la rata de bits máxima a la que se puede trabajar para redes mesh, enlaces punto a punto y multipunto en el estándar IEEE802.11g, de acuerdo a esos resultados se observa que la rata que se debe seleccionar para los enlaces debe ser de 36Mbps para los enlaces de 20 y 30kms y de 18Mbps para los enlaces de 40 y 50 km.

Figura 6.39. Gráfica de distancia vs rata de bits.



Fuente: Tomado de [17]

En la tabla 6.20 se muestran los resultados obtenidos para el enlace de 20 km realizando el ajuste en la rata de transmisión a 36Mbps y la potencia se mantuvo en 14 dBm. Los valores máximos de throughput en el estándar IEEE802.11g para TCP y UDP fueron de 15.5 Mbits/s y de 17.54Mbits/s. Para el estándar IEEE802.11b fueron de 4.96 Mbits/s para TCP y de 5.95Mbits/s para UDP

Tabla 6. 20. Pruebas de laboratorio para 20km.

Enlace 20 km laboratorio															
Protocolo	Estándar IEEE 802.11x	Potencia Radios	Rata	Acktimeout	Slottime	Tiempo Duracion	Throughput Mbits/s	Iperf Servidor	Transmisión Mbytes	Jitter (ms)	Lost/total	Reporte iperf			
TCP	g	14dBm	36M	179	75	180	15.5	Sta	No aplica	No aplica	No aplica	Cliente			
UDP							20M					16.3	Cliente		
							25M					17.22	Cliente		
UDP							20M					16.63	429	0.606	2/306122(0.00065%)
	25M		17.54	460	0.64		49/327882(0.015%)	Servidor							
TCP	b		14dBm	11M	179		86	180	4.96	Sta	No aplica	No aplica	No aplica	Cliente	
UDP									5M					4.73	Cliente
									7M					5.82	Cliente
UDP		5M				4.84			107					1.874	1/76526(0.0013%)
	7M	5.95		134	2.857	65/95408(0.068%)	Servidor								

6.4.5 Enlace de 30kms. Este enlace al igual que el de 20kms se trabajó con una tasa de transmisión de 36Mbps y se obtuvieron valores de throughput máximos de 13.3 y 13.25Mbps/s para TCP y UDP respectivamente, bajo el estándar 802.11g, así mismo los valores de throughput máximos para el estándar IEEE802.11b fueron de 4.39 y 5.33 Mbps/s en TCP y UDP respectivamente. La tabla 6.21 resume los resultados de las pruebas para este enlace para el cual se realizaron 3 pruebas de 180 segundos cada una para los dos estándares.

Tabla 6.21. Pruebas de laboratorio para 30km.

Enlace 30 km laboratorio																						
Protocolo	Estándar IEEE 802.11x	Potencia Radios	Rata	Acktimeout	Slottime	Tiempo Duracion	Throughput Mbits/s	Iperf Servidor	Transmisión Mbytes	Jitter (ms)	Lost/total	Reporte iperf										
TCP	g	14dBm	36M	246	108	180	13.3	Sta	No aplica	No aplica	No aplica	Ciente										
UDP							15M					11.95	Ciente									
							20M					13	Ciente									
							15M					12.2	322	0.742	0/229592(0%)	Servidor						
							20M					13.25	359	1.032	88/256167(0.034%)	Servidor						
TCP							b					11M	246	119	180	4.39	Sta	No aplica	No aplica	No aplica	Ciente	
UDP																7M					5.21	Ciente
																11M					5.22	Ciente
	7M	5.32	123	3.13	61/87557(0.07%)	Servidor																
	11M	5.33	123	2.229	8/87694(0.0091%)	Servidor																

6.4.6 Enlace 40kms. La tabla 6.22 resume los resultados de las pruebas realizadas para este enlace, la tasa cambió a 18Mbps. Los valores máximos de throughput en el estándar IEEE802.11g para TCP y UDP fueron de 7.51 Mbps/s y de 6.18Mbps/s. Para el estándar IEEE802.11b fueron de 3.93 Mbps/s para TCP y de 4.93Mbps/s para UDP

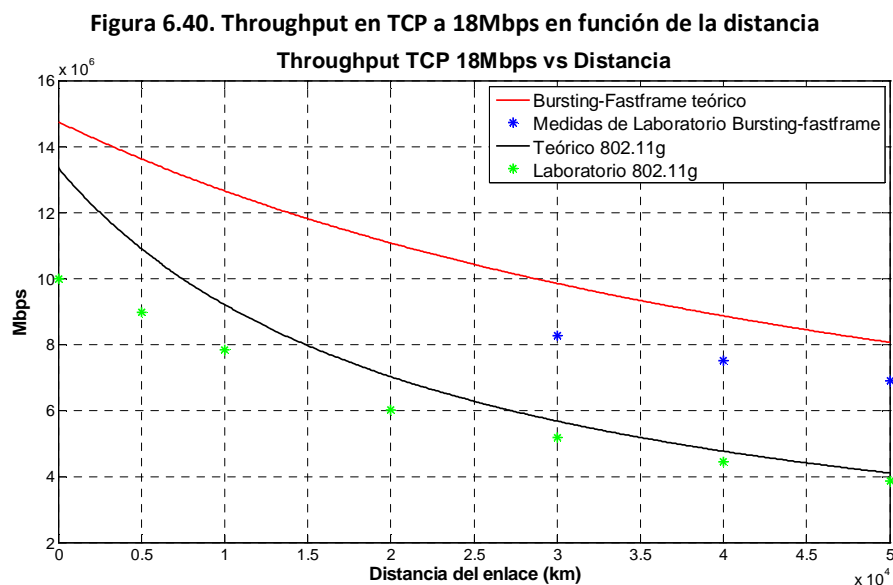
Tabla 6.22. Pruebas de laboratorio para 40km.

Enlace 40 km laboratorio													
Protocolo	Estándar IEEE 802.11x	Potencia Radios	Rata	Acktimeout	Slottime	Tiempo Duracion	Throughput Mbits/s	Iperf Servidor	Transmisión Mbytes	Jitter (ms)	Lost/total	Reporte iperf	
TCP	g	14dBm	18M	313	141	180	7.51	Sta	No aplica	No aplica	No aplica	Ciente	
UDP							11M					6.06	Ciente
							5M					4.49	Ciente

6.5.1. Throughput contra distancia en TCP

Debido a que en las pruebas de campo se buscaba, además de mantener un enlace estable, encontrar el valor máximo de throughput en la red punto a punto implementada, solo se realizaron tomas de medidas usando el mayor valor de la rata de bits que permitiera esta característica, sin embargo debido a que se cuenta con un modelo teórico para cada una de las ratas que el estándar IEEE802.11 permite seleccionar, se realizaron pruebas de laboratorio para cada una de estas ratas y se graficaron para contrastar al menos estas pruebas con dicho modelo.

La figura 6.40 presenta una gráfica con los resultados teóricos y de laboratorio obtenidos en TCP para una rata de 18Mbps bajo el estándar 802.11g. La línea roja en dicha gráfica representa el modelo teórico de throughput vs distancia usando las técnicas bursting y fast frame, claramente estos resultados son los que presentan un mayor valor para el throughput en todas las distancias, muy cerca a estos datos se encontraron los resultados de laboratorio usando las dos técnicas también. Al final se encontró, como era de esperarse, que al deshabilitar las dos características tanto fast frame como bursting, el throughput es menor, esta diferencia crece a medida que se hace mayor la distancia del enlace.



En la figura 6.41 se muestran los resultados de throughput vs distancia arrojados por el modelo teórico del estándar IEEE802.11g cuando se trabaja con una rata de 36Mbps, de esta manera se presentan los resultados teóricos con el uso y sin el uso de las técnicas de bursting y de fastframe. Además se añadieron los resultados de laboratorio obtenidos para ambos casos. Los resultados coinciden con el comportamiento que se esperaba, también se puede apreciar que en las pruebas de campo los resultados son menores a lo esperado, mostrando claramente que tanto las condiciones climáticas y geográficas de la región, junto

con errores en la alineación de las antenas influyen significativamente en el desempeño del enlace, sin embargo también se ve que los resultados son suficientemente buenos y tienen un comportamiento semejante al que tienen los modelos teóricos.

La figura 6.42 presenta los resultados de throughput contra distancia para el estándar IEEE802.11g con una tasa de 54Mbps. Estos resultados son los encontrados teóricamente y en laboratorio usando y sin usar las técnicas de bursting y de fastframe, además se agregaron 3 datos obtenidos en pruebas de campo, la tendencia se mantiene igual en laboratorio y teóricamente, sin embargo se puede apreciar que para cortas distancias esta tasa tuvo un desempeño regular en las pruebas de campo, esto ocurre porque esos enlaces se hicieron en la ciudad entre dos edificios que tenían muchos enlaces inalámbricos alrededor, lo cual generaba una interferencia que se vuelve más significativa para tasas de bits altas porque requieren un mayor nivel de SNR (relación señal a ruido). Si por el contrario se analiza el valor obtenido en campo para 4,7 km se ve que el resultado es bastante cercano al esperado teóricamente, esto permite concluir nuevamente que entre menos factores externos afecten el enlace, el desempeño del mismo será cercano al esperado teóricamente.

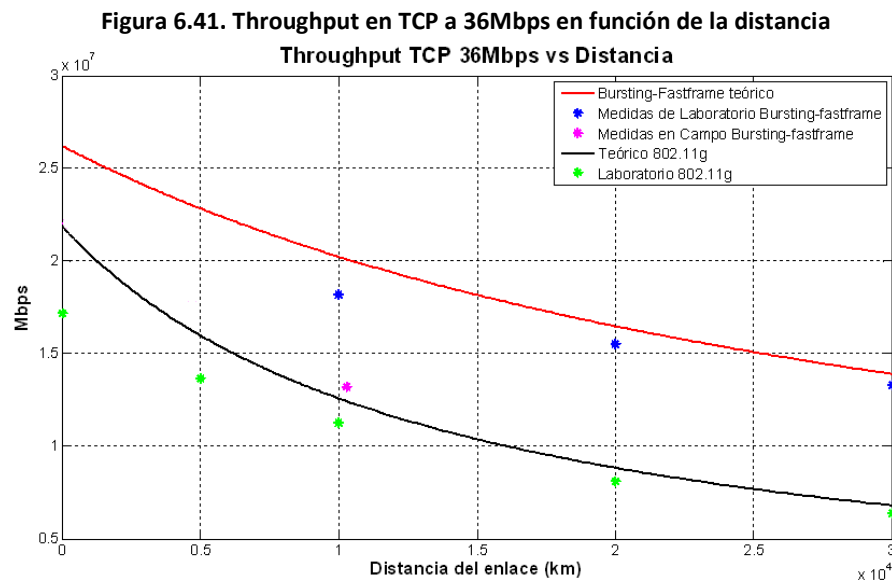
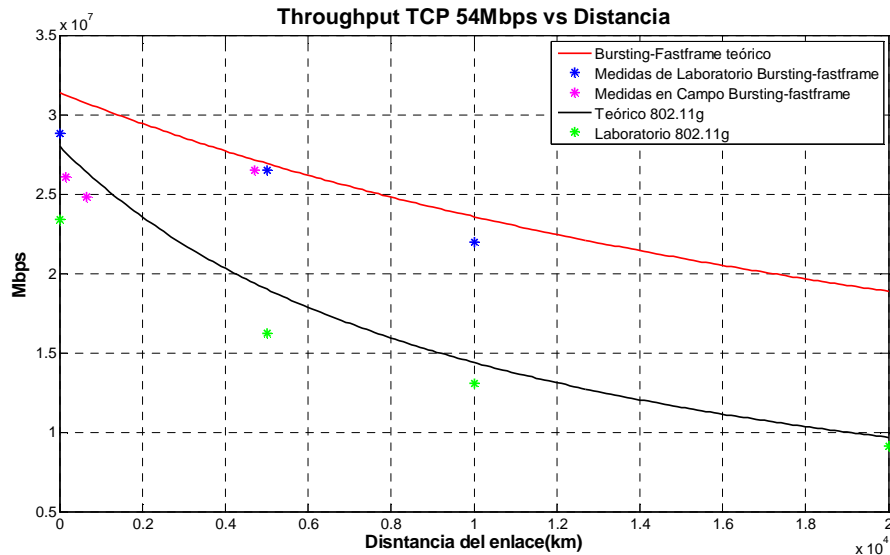
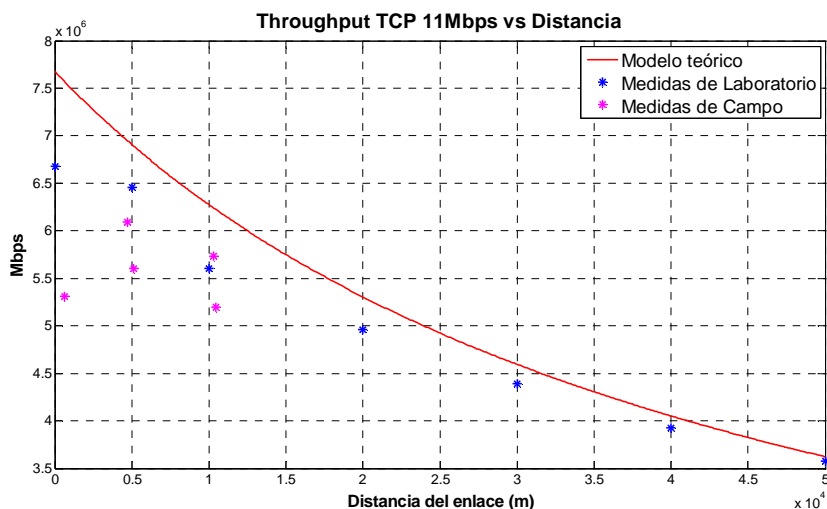


Figura 6.42. Throughput en TCP a 54Mbps en función de la distancia



Además de los resultados obtenidos para el estándar IEEE802.11g, se realizaron gráficas con los resultados obtenidos para el estándar IEEE802.11b. En la figura 6.43 se consignan los resultados de throughput vs distancia en TCP tanto teóricos como de las pruebas de campo y laboratorio para este estándar, con una tasa de 11Mbps. Como es de esperarse el modelo teórico arroja los valores más altos para todas las distancias y se puede apreciar que los resultados de laboratorio se ajustan bastante bien especialmente para las mayores distancias. Los resultados de las pruebas de campo son bastante cercanos a los esperados y se puede apreciar que este estándar mantiene un throughput muy similar para todas las distancias cubiertas en las pruebas.

Figura 6.43. Throughput en TCP a 11Mbps en función de la distancia



6.5.2. Throughput contra distancia en UDP.

En la figura 6.44 se realizó la gráfica teórica para UDP para una rata de 54Mbps, junto con los resultados obtenidos en campo y en laboratorio, el throughput obtenido en campo no es tan alto como el que se encontró en TCP, debido a que para UDP no se pueden usar las técnicas de fast frame ni de bursting. A su vez la figura 6.45 presenta los datos obtenidos para UDP con una rata de 36Mbps, para estos resultados los datos de laboratorio son mucho más cercanos al modelo teórico que para la rata de 54 Mbps.

Figura 6.44. Throughput en UDP a 54Mbps en función de la distancia

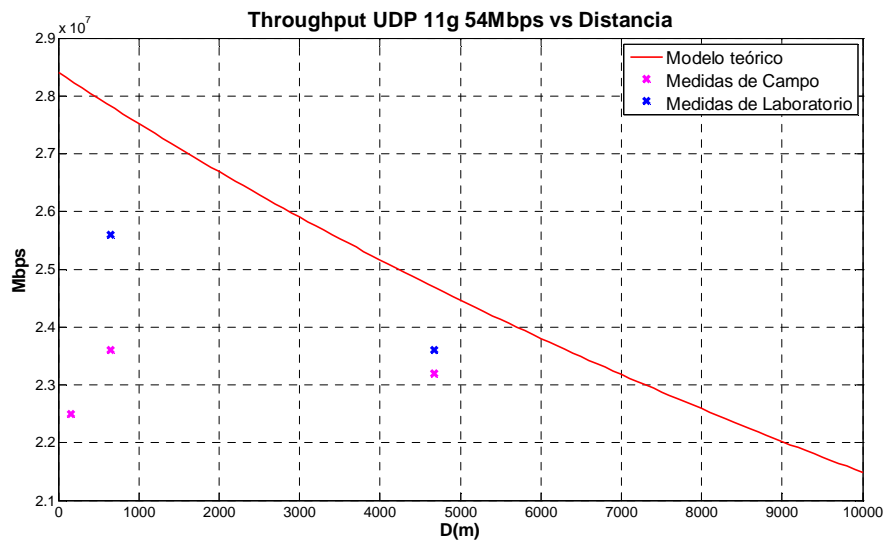
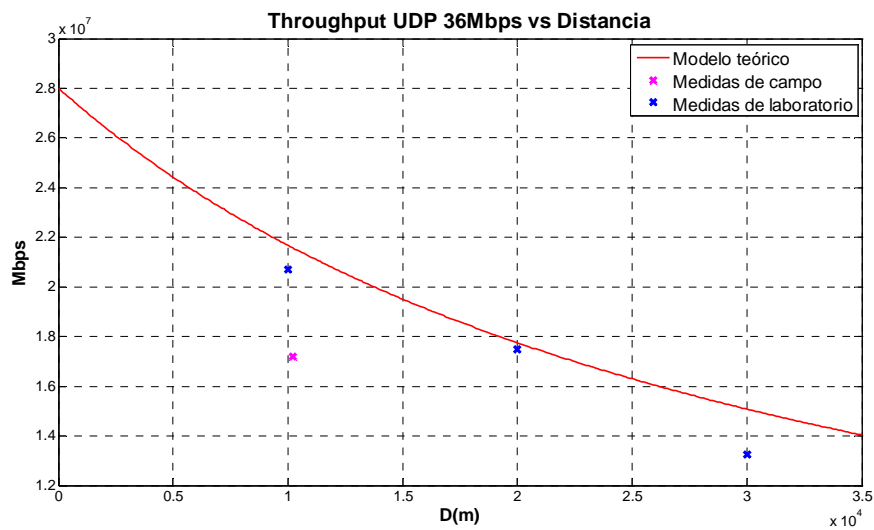
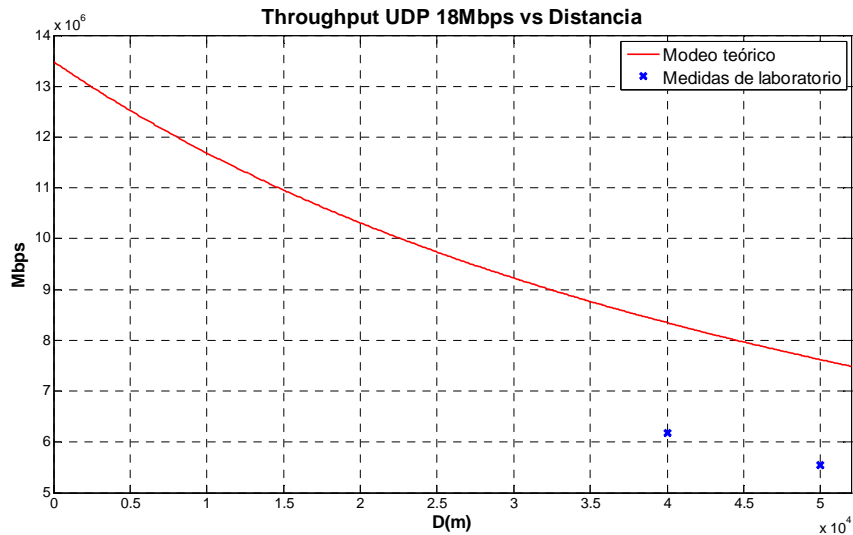


Figura 6.45. Throughput en UDP a 36Mbps en función de la distancia



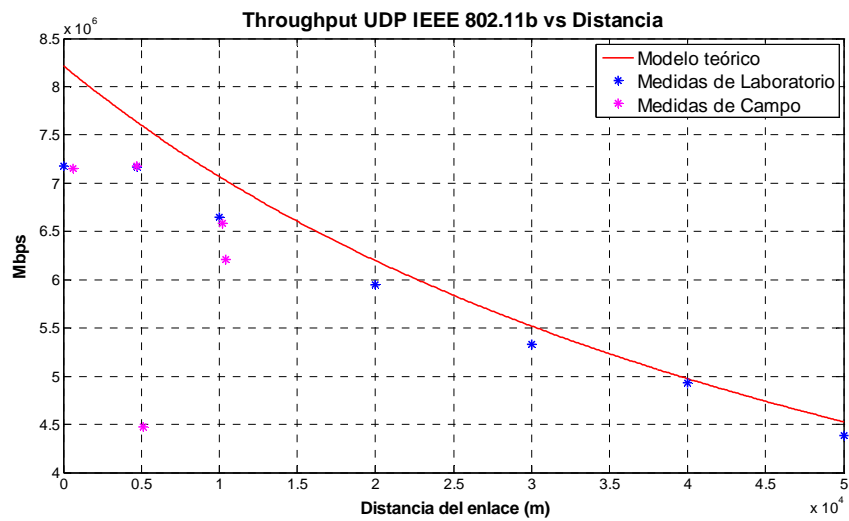
La figura 6.46 muestra los resultados para las pruebas de mayor distancia con una tasa de 18 Mbps, para esta tasa solo se tienen datos de pruebas de laboratorio para dos distancias y al comparar estos valores con los datos teóricos se encuentra un error de aproximadamente 2Mbps, aunque el comportamiento de los valores es muy similar al esperado..

Figura 6.46. Throughput en UDP a 18Mbps en función de la distancia



Para finalizar el capítulo, se presentan los datos obtenidos para UDP bajo el estándar IEEE802.11b, para este estándar no fue necesario modificar la tasa de bits de operación, por lo tanto todos los datos de pruebas de laboratorio y de campo se consignan en una sola gráfica junto con el modelo teórico.

Figura 6.47. Throughput en UDP a 11Mbps en función de la distancia



En la tabla 6.24 se resumen los resultados usados para graficar el comportamiento de los enlaces tanto en laboratorio como en campo, estos resultados son los valores máximos de throughput que se encontraron para cada enlace realizado tanto para UDP como para TCP para el estándar IEEE802.11g/b, las casillas para las cuales no se tienen pruebas se marcaron con una X.

Tabla 6.24. Resumen Pruebas.

THROUGHPUT MÁXIMO PROMEDIO														
Enlace	Pruebas Campo						Pruebas Laboratorio							
	TCP 11g		UDP 11g		TCP 11b	UDP 11b	TCP 11g			UDP 11g			TCP 11b	UDP 11b
	54 Mbps	36 Mbps	54 Mbps	36 Mbps	11Mbps	11Mbps	54 Mbps	36 Mbps	18 Mbps	54 Mbps	36 Mbps	18 Mbps	11Mbps	11Mbps
A-B (160m)	26.06	X	22.5	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
B-C (650m)	24.8	X	23.6	X	5.31	7.15	23.6	X	X	25.6	X	X	6.77	7.78
D-E (4.7km)	26.5	X	23.2	X	6.09	7.18	27	X	X	23.6	X	X	6.09	7.17
E-F (10.2km)	X	13.2	X	17.2	5.73	6.58	X	19.05	X	X	20.66	X	5.61	6.65
B-I (5.01km)	X	X	X	X	5.6	4.48	X	X	X	X	X	X	X	X
G-H (10.46km)	X	X	X	X	5.2	6.21	X	X	X	X	X	X	X	X
20 km	X	X	X	X	X	X	X	15.5	X	X	17.54	X	4.96	5.95
30 km	X	X	X	X	X	X	X	13.3	X	X	13.25	X	4.39	5.33
40 km	X	X	X	X	X	X	X	X	7.51	X	X	6.18	3.93	4.93
50 km	X	X	X	X	X	X	X	X	6.9	X	X	5.55	3.58	4.39

7. CONCLUSIONES

- Se diseñó una metodología de pruebas para medir el throughput en función de la distancia en el rango de 0 a 50 km. Esta metodología permitió establecer un modelo para predecir el comportamiento del throughput TCP y UDP unidireccional para el estándar IEEE802.11 b/g.
- Se diseñó una metodología de pruebas para estimar la manera en la que los niveles de intensidad de campo varían según la distancia del enlace, tomando en cuenta que el chipset Atheros usado por los radios XR2, define el RSSI como la relación señal a ruido.
- Al comparar los modelos teóricos de throughput TCP y UDP sobre el estándar IEEE.802.11b/g (variando los parámetros MAC en función de la distancia), las medidas obtenidas en laboratorio y las medidas obtenidas en campo, se puede apreciar como la interferencia y la existencia de redes en el mismo canal, disminuye significativamente el throughput.
- El throughput mejora significativamente en el estándar IEEE802.11g al activar las técnicas de Bursting y Fast Frame. La primera técnica permite eliminar la ventana de contienda, lo cual disminuye el intervalo de tiempo entre el arribo consecutivo de tramas; la segunda permite aumentar el tamaño de la MTU de 1500 bytes a 3000 bytes. Al implementar las dos técnicas se eliminan los tiempos de DIFS, SIFS y de espera del ACK, por cada dos tramas de 1500 bytes transmitidas.
- Se evidenció una disminución del throughput en más del 40% de lo esperado para el enlace G-H cuando la velocidad de transmisión es de 54 Mbps, debido a que la zona de Fresnel se vio obstruida. Para mitigar este fenómeno se debió disminuir la velocidad de transmisión.
- La máxima distancia que se puede alcanzar en un enlace WiFi tiene las limitaciones del valor máximo de ACKtimeout que permite establecer el chipset Atheros del radio para el estándar IEEE802.11g. Este valor no puede pasar de 374 us, lo cual delimita la distancia que se puede alcanzar con estos radios a 50 km. Sumado a esto, hay otra limitación en la capa física por la normatividad que regula la máxima PIRE vigente en Colombia.
- Se comprobó que el valor del ACKtimeout debe ser mayor que el doble del tiempo que demora una trama en viajar a través del enlace de un nodo al otro, si este tiempo es menor, el nodo transmisor reenvía la trama al no recibir el ACK antes que expire el ACKtimeout, generando retransmisiones y colisiones entre las tramas reenviadas y los ACK, lo cual lleva a que se disminuya el throughput drásticamente.

- Se caracterizó el throughput para enlaces punto a punto seleccionando el slottime cercano al que maximiza el throughput. Si se mantiene el slottime del estándar la probabilidad de colisión aumenta significativamente y el throughput disminuye considerablemente. Por otro lado, si el slottime se selecciona muy grande para minimizar la probabilidad de colisión, el valor de la ventana de contención aumenta demasiado, lo cual lleva a que el throughput disminuya.
- La comparación entre los resultados de las simulaciones usando Radio Mobile con las medidas obtenidas en campo, muestra que este software refleja fielmente las condiciones de radio propagación de la zona geográfica cubierta durante este trabajo, permitiendo simular enlaces inalámbricos en Bucaramanga y sus zonas aledañas.
- Se construyeron y se implementaron dos nodos WiFi de bajo consumo de potencia, los cuales permitieron establecer enlaces punto a punto para largas distancias, de acuerdo a los requisitos exigidos por el proyecto de Colciencias “Diseño y caracterización de un sistema autónomo constituido por nodos WiFi en áreas rurales alimentados con módulos fotovoltaicos”.
- La precisión en la alineación de las antenas y el perfecto estado de las mismas juegan un factor importante para obtener un enlace estable de buena calidad. Es por esta razón que se debe procurar tener la mayor cantidad de elementos que faciliten la alineación con exactitud de manera que se obtengan enlaces con el mejor desempeño posible rápida y eficazmente.
- Los productos generados por este proyecto consisten en dos prototipos WiFi de bajo consumo de potencia que permiten realizar enlaces punto a punto y un documento que compila la experiencia obtenida en el desarrollo de este trabajo.

RECOMENDACIONES

La escogencia del sitio es fundamental, debido a que al trabajar en zonas aledañas a las urbanas, la interferencia puede afectar en gran medida el throughput máximo esperado, sobre todo para ratas de bits altas como la de 54 Mbps.

Además de la necesidad de tener línea de vista entre los nodos inalámbricos, hay que recordar que la zona de fresnel cubre un área extensa, razón por la cual cualquier obstáculo cercano o invasión en dicha zona, puede afectar la calidad del enlace.

Para este tipo de proyectos realizados en zonas rurales el mejor horario para realizar campañas de medidas es entre las 8 am y el medio día si se tienen prototipos que se instalen temporalmente, ya que los fuertes vientos que se presentan en la mayoría de las zonas rurales afectan la alineación de las antenas haciendo más difícil el trabajo de campo. Si el prototipo es instalado por un largo periodo de tiempo y se fija de manera fuerte, se puede prescindir de esta recomendación

TRABAJOS FUTUROS

- Estudiar e implementar la viabilidad de TDMA como un método alternativo de acceso al medio en la capa física del estándar 802.11 para redes de enlaces punto a punto, con el fin de evaluar si es posible una mejor utilización del canal en contraste con el método CSMA/CA utilizado en este trabajo de grado.
- Diseñar una metodología de pruebas que permita caracterizar el throughput en enlaces de largo alcance utilizando el modo EDCA (Enhanced Distributed Channel Access) el cual está basado en el estándar 802.11e y provee soporte de calidad de servicio (QoS).
- Tomando en cuenta el throughput sobre 100 Mbps ofrecido por el estándar 802.11n, caracterizar el desempeño del mismo para enlaces de larga distancia.
- Diseñar una metodología de pruebas que permita caracterizar las redes tipo malla en entornos rurales, tomando en cuenta que la viabilidad de los enlaces de larga distancia de bajo costo podría proveer de servicio de internet a dichas zonas y por lo tanto se hace necesario un estudio para la distribución del servicio en zonas de baja densidad poblacional.

BIBLIOGRAFIA

- [1] ALONSO MONTES, José I. ALMOROX GONZÁLEZ, Pablo. RODRÍGUEZ SALAZAR, José A. *Wi-Fi: El diferente uso del espectro en EEUU y Europa*. Disponible en: <http://www.coit.es/publicaciones/bit/bit149/59-63.pdf>
- [2] Atheros Communications, Ink. *Super G, Maximizing Wireless Performance*. 2004.
- [3] BARCLAY, Les. *Propagation of Radiowaves*. -2nd ed. 2003: The Institution of Electrical Engineers. Chapters 2, 19 and 20.
- [4] CRCnet Waikato Network. *Network Topology and Status*. Disponible en: <http://www.crc.net.nz/topology.php>
- [5] CURTIS, Jamie. WAND Network Research Group. *Connecting Rural Communities using WiFi*. University of Waikato. Disponible en: <http://www.crc.net.nz/presentations/QuestNet2004.pdf>
- [6] Estándar IEEE802.11. Versión 2007
- [7] Grupo de Ingeniería Telemática, Universidad del Cauca. Implementación de IEEE 802.11 en enlaces largos para zonas rurales aisladas. Disponible en: <http://indico.rnp.br/getFile.py/access?contribId=18&resId=0&materialId=paper&confId=12>
- [8] Grupo de Telecomunicaciones Rurales, Pontificia Universidad Católica del Perú. *Redes inalámbricas para zonas rurales*, primera edición, Enero 2008. Capítulo 1
- [9] Grupo de Telecomunicaciones Rurales, Pontificia Universidad Católica del Perú. *Redes Inalámbricas para Zonas Rurales*. Primera edición, Enero 2008.
- [10] H. Wong. (2002, November, 01). Field Strength Prediction in Irregular Terrain – the PTP Model. FCC [Online]. Disponible en: <http://www.fcc.gov/oet/ftm/ptp/report.pdf>
- [11] Hacker Friendly LLC. *Redes Inalámbricas en los Países en Desarrollo*. Tercera Edición. Septiembre 2008. ISBN: 978-0-9778093-7-0. Disponible en: <http://wndw.net/download.html>
- [12] Hoja de datos motherboard Alix 2D2. Disponible en: <http://resources.mini-box.com/online/MBD-P-ALIX-2D2/MBD-P-ALIX-2D2-manual.pdf>
- [13] Hoja de datos motherboard Soekris net4801. Disponible en: http://www.soekris.com/manuals/net4801_manual.pdf
- [14] Hoja de datos radio XR2. Disponible en: http://ubnt.com/downloads/xr2_datasheet.pdf

- [15] Institute for Telecommunication Sciences (ITS). *NTIA Report TR-82-100. A Guide to the Use of the ITS Irregular Terrain Model in the Area Prediction Mode*. April 1982. G.A. Hufford, A.G. Longley, W.A. Kissick. Disponible en: <http://www.its.bldrdoc.gov/pub/ntia-rpt/82-100/index.php>
- [16] "Iperf". University of Central Florida. (2009, Agosto) [Internet]. Disponible en: <http://www.noc.ucf.edu/Tools/Iperf/default.htm>
- [17] J. S. Reigadas, A. M. Fernandez, J. R. Lopez, and J. S. Pascual. *Modeling and optimizing IEEE 802.11 DCF for long-distance links, Transactions on mobile computing*, VOL. V, NO. N, MMM 2010.
- [18] J.D. Gibson, *The Mobile Communications Handbook*. Florida, USA: CRC Press, Inc., 1986
- [19] J.M. Hernando y F. Pérez-Fontan, *Introduction to Mobile Communications Engineering*. Boston, USA: Artech House, 1999
- [20] M. Barría, P. Sánchez, R. Vallejos. *Modelo realista para la función DE COORDINACIÓN DISTRIBUIDA DEL ESTÁNDAR IEEE 802.11b*. Agosto de 2005.
- [21] MEZA MEZA, Leonardo. MORENO DIAZ, Jorge Diego. *Selección, simulación y caracterización de un sistema de energía solar fotovoltaica para alimentación de nodos Wi-Fi en áreas rurales*. Bucaramanga : s.n., 2010.
- [22] Network Measurements Working Group. *A hierarchy of network performance characteristics for grid applications and services*. 2003
- [23] P.L. Rice, A.G. Longley, K.A. Norton, and A.P. Barsis, *Technical Note 101 – Transmission Loss Predictions for Troposphere Communication Circuit*. National Bureau of Standards, 1967.
- [24] Packet Loss Characterization in WiFi-based Long Distance Networks Disponible en: http://tier.cs.berkeley.edu/docs/wireless/wild_character.pdf.
- [25] PATRA, Rabin. WiLDNet: Network protocol design for WiFi based long distance networks. Disponible en: http://tier.cs.berkeley.edu/docs/wireless/wild_multihop.pdf.
- [26] R. Díaz. *Diseño caracterización de un sistema autónomo constituido por nodos WiFi en áreas rurales alimentados con módulos fotovoltaicos*.
- [27] RECOMMENDATION ITU-R P.527-3 - *Electrical characteristics of the surface of the earth*. ITU-R,1992.

- [28] RECOMMENDATION ITU-R P.833-4 – *Attenuation in vegetation*: ITU-R, 2003.
- [29] S. Delgadillo, D. Guzmán, A. Müller, W. Grote. *Análisis experimental de un ambiente wi-fi multicelda*. octubre de 2005
- [30] S. Ntutumu. *Parametrización de IEEE 802.11e EDCA para la priorización del tráfico VoIP en redes extensas para zonas rurales de países en vías de desarrollo*.
URJC/TSC ETSI de Telecomunicación – Camino del Molino s/n – 28943 Madrid (Spain)
- [31] SIMÓ-REIGADAS, Javier. MARTÍNEZ-FERNÁNDEZ, Andrés. RAMOS-LÓPEZ, Javier. SEOANE-PASCUAL, Joaquín. *Modeling and optimizing IEEE 802.11 DCF for long-distance links*.
- [32] Sitio Web de Linux Embebido. Disponible en: <http://linuxemb.wikidot.com/tesis-c2>
- [33] Sitio Web de Linux for Divices. Disponible en:
<http://www.linuxfordevices.com/c/a/Linux-For-Devices-Articles/Why-device-developers-prefer-Debian/>
- [34] Sitio Web de Voyage Linux. Disponible en: <http://linux.voyage.hk/>
- [35] Soresh, Susana. *Simplifying Fault Diagnosis in Locally Managed Rural WiFi Networks*.
Disponible en: http://tier.cs.berkeley.edu/docs/wireless/nsdr_diagnosis.pdf.
- [36] The madwifi project. *RSSI in Madwifi*. Disponible en: <http://madwifi-project.org/wiki/UserDocs/RSSI>
- [37] U.S. Department of Commerce NTIA/ITS. Institute for Telecommunication Sciences. Irregular Terrain Model (ITM) (Longley-Rice). Diponible en:
<http://flattop.its.bldrdoc.gov/itm.html>

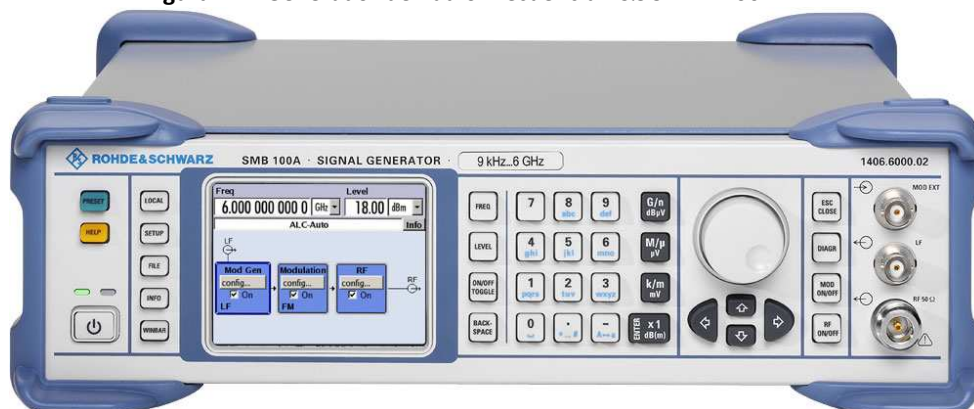
ANEXO A.

Descripción de los equipos de medida y caracterización del cable RG6

Con el objetivo de proveer un contexto donde se pudieran controlar ciertas variables de carácter aleatorio y/o dependiente del ambiente, en las pruebas de laboratorio se emularon las pérdidas por radiopropagación, las cuales se estudiaron en el capítulo 1; para ello se usó un rollo de cable de marca Quest con referencia QCC RG6 el cual está diseñado para trabajar a una frecuencia de hasta 3 GHz. Sin embargo, no se contaba con la hoja de datos del fabricante, luego no se tenían los datos de atenuación por metro para las frecuencias de operación de los estándares IEEE802.11 g/b. Para solucionar este inconveniente se realizó una caracterización del cable para los 11 canales utilizados por los dos estándares, usando: un generador de señales de radiofrecuencia de marca Rohde&Schwarz, y dos medidores de potencia marca Rohde&Schwarz y marca Keithley. Adicionalmente, se utilizó el analizador de espectros marca Rohde&Schwarz con el fin de observar el espectro de la señal del radio en el canal de comunicación, ya que a diferencia del generador de radiofrecuencia el radio no da la señal en un punto discreto si no que se expande alrededor del canal donde está ubicado. A continuación se presentarán las características más relevantes para cada equipo y el procedimiento seguido para la caracterización del cable cuyo producto final es la tabla A.1. Finalmente, con los datos obtenidos se procede a calcular la cantidad de cable correspondiente a las pérdidas por transmisión de los enlaces emulados en las pruebas de laboratorio.

- **Generador de Radio Frecuencia R&S SMB-B106.** El rango de frecuencias que maneja este equipo es de 9 kHz a 6 GHz y tiene una potencia máxima de salida de 30 dBm, además una interfaz gráfica que lo hace muy sencillo de manejar [1]. Estas características del dispositivo son ideales, debido a que trabaja en los rangos de operación que se utilizan en las motherboard para frecuencia y potencia. La figura A.1 muestra una fotografía del generador.

Figura A.1. Generador de Radio Frecuencia R&S SMB-B106



Tomado de [1]

- **Medidor de Potencia R&S NRP-Z11.** Este dispositivo permite realizar mediciones de potencia de hasta 23 dBm en un rango de frecuencias entre 9 kHz y 6 GHz. En la figura A.2 se presenta una fotografía del equipo en donde se aprecia que uno de los extremos tiene un conector tipo N para usarlo con generadores de señal y analizadores de espectros con ese tipo de conector, el otro extremo del dispositivo tiene un conector a puerto USB el cual se conecta a un computador para realizar la toma de medidas mediante una interfaz gráfica sencilla de manejar. [2]

Figura A.2. Medidor de Potencia R&S NRP-Z11.



[Tomado](#) de [2]

- **Medidor de potencia Keithley 3500.** Este equipo permite realizar medidas de potencia de hasta 20 dBm para un rango de frecuencias entre 10MHz y 6 GHz, el problema de este dispositivo es que solo hace saltos de 10 MHz por esta razón no se pudieron realizar medidas para frecuencias como 2.412 GHz. Al igual que el medidor R&S tiene un conector tipo N y además se debe conectar a la red eléctrica[3]. En la figura A.3 se muestra una fotografía del equipo.

Figura A.3. Medidor de Potencia Keithley 3500.



Tomado de [3]

- **Analizador Vectorial R&S ZVL6.** El analizador Vectorial permite trabajar hasta 6 GHz. En la figura A.4 se muestra la fotografía del equipo [4]. Este equipo se utilizó para realizar las mediciones cuando se conectaban las motherboards ya que permite observar todas las componentes espectrales de la señal analizada.

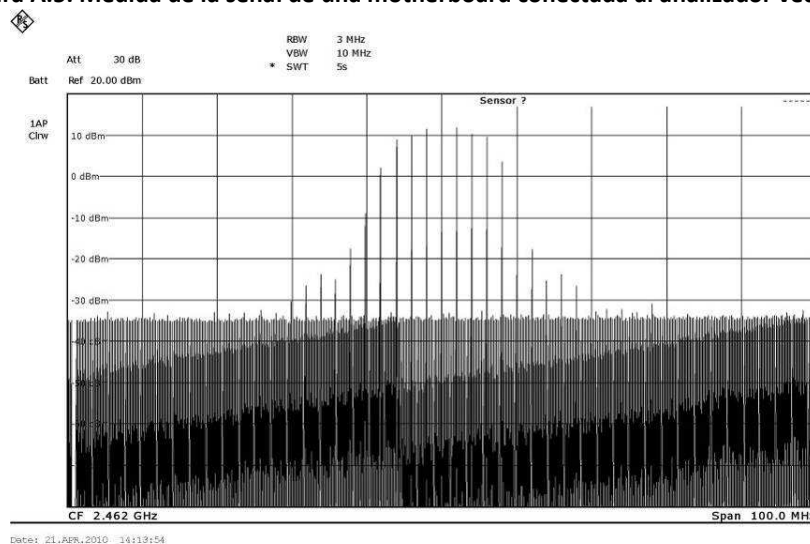
Figura A.4. Analizador Vectorial R&S ZVL6.



Tomado de [4]

La figura A.5 muestra una imagen con la medida de la señal de una motherboard, sin estar enviando datos a la red, conectada directamente al analizador, se ajustó un Span de 100 MHz y una referencia de 20 dBm.

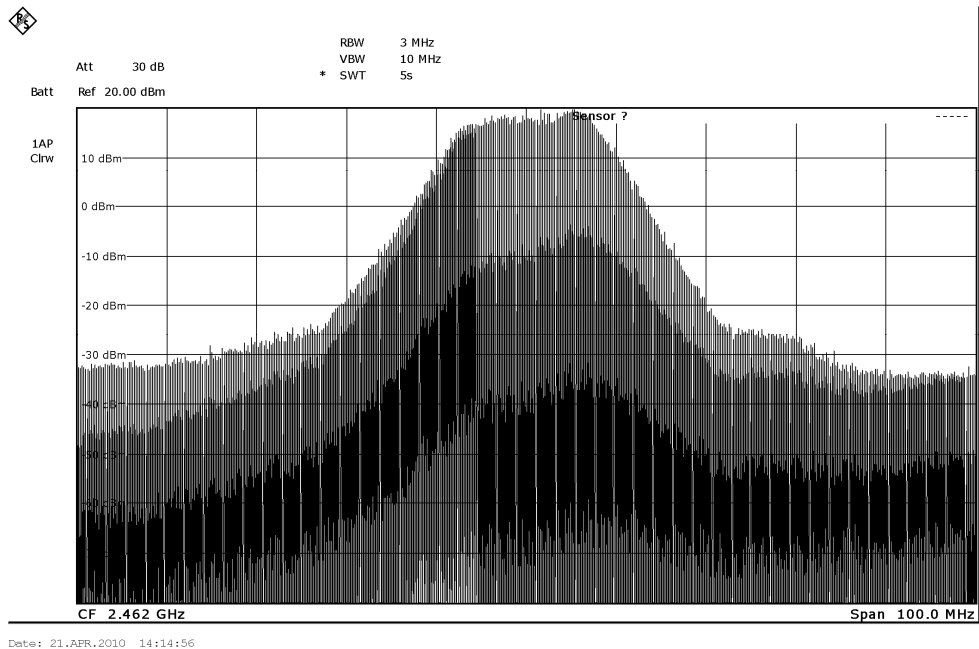
Figura A.5. Medida de la señal de una motherboard conectada al analizador vectorial



Fuente: Analizador de espectros

La figura A.6 muestra la misma prueba que la anterior figura, con la diferencia de que ésta vez el radio si está enviando paquetes a la red.

Figura A.6. Medida de la señal de una motherboard conectada al analizador vectorial con el radio transmitiendo.



Fuente: Analizador de espectros

El uso de este equipo permitió analizar las señales de transmisión de las motherboards, de manera que se observara claramente las componentes espectrales del espectro y su comportamiento en el canal seleccionado.

- **Caracterización del cable RG6.** En la tabla A.1 se presentan los datos obtenidos durante la caracterización de 20 metros de cable, se realizó con esta cantidad de cable para que las pequeñas variaciones en la medida de potencia no afectaran la caracterización del mismo, las dos primeras columnas presentan el canal y las frecuencias de operación, la siguiente columna contiene las medidas a la salida del generador de señales, luego se realizaron medidas usando un adaptador macho a hembra tipo N, de esta manera se obtendrá la atenuación de los conectores tipo N usados para unir los cables a las motherboards. Luego se tienen los datos de potencia utilizando ambos medidores de potencia para cada una de las frecuencias trabajadas. Con esos datos se encuentra la atenuación para 20 metros de cable Quest QCC RG6.

Tabla A.1 Caracterización de 20 metros de cable Quest QCC RG6.

Cable Quest 20 metros								
Canal	Frecuencia GHz	Potencia directa (dBm)	Potencia Adaptador (dBm)	Atenuación Adaptador (dB)	Potencia Cable R&S (dBm)	Atenuación cable sin adaptador (R&S)	Potencia Cable Keithley	Atenuación cable sin adaptador (Keithley)
1	2.412	9.79	9.73	0.06	-1.41	11.32	-1.52	11.43
2	2.417	9.79	9.72	0.07	-1.19	11.12	-1.26	11.19
3	2.422	9.79	9.72	0.07	-1.24	11.17	-1.31	11.24
4	2.427	9.79	9.71	0.08	-1.45	11.4	-1.59	11.54
5	2.432	9.79	9.71	0.08	-1.6	11.55	-1.73	11.68
6	2.437	9.8	9.71	0.09	-1.45	11.43	-1.62	11.6
7	2.442	9.8	9.71	0.09	-1.23	11.21	-1.35	11.33
8	2.447	9.8	9.7	0.1	-1.33	11.33	-1.48	11.48
9	2.452	9.8	9.7	0.1	-1.68	11.68	-1.86	11.86
10	2.457	9.8	9.7	0.1	-1.54	11.54	-1.78	11.78
11	2.462	9.8	9.7	0.1	-1.17	11.17	-1.37	11.37

- Cálculo de la cantidad de cable necesario para emular las pérdidas en cada prueba de laboratorio.** Como se había explicado anteriormente la medida más confiable es la del medidor R&S debido a que permite trabajar en la frecuencia exacta de operación usada, por esta razón la atenuación encontrada con ese medidor fue la que se tuvo en cuenta al final. De acuerdo a los resultados mostrados en la tabla A.1 se determinó realizar las pruebas de laboratorio en el canal 9 debido a que es la frecuencia en la que el cable presenta mayores pérdidas y disminuiría un poco la cantidad de cable requerido para emular las pérdidas. En la tabla A.2 se muestran las atenuaciones por radiopropagación para las distancias elegidas en las pruebas de laboratorio, de acuerdo a las atenuaciones encontradas se calculó la cantidad de cable necesario para realizar los enlaces en el laboratorio. El cable necesario para realizar las pruebas fue de 172 metros aproximadamente.

Tabla A.2. Cantidad de cable en función de la distancia del enlace

Distancia (Km)	Atenuación (dB)	Cantidad de cable necesario (m)
0.65	62.4787	106.984075
4.674	79.6142	136.325685
10.212	86.4026	147.949658
20	92.241	157.946918
30	95.7628	163.977397
40	98.2616	168.256164
50	100.1998	171.575

REFERENCIAS

[1] Hoja de datos disponible en: http://www2.rohde-schwarz.com/en/products/test_and_measurement/signal_generation/SMB100A-%7C-Front_View-%7C-30-%7C-3007.html

[2] Hoja de datos en el sitio web:
<http://www2.rohde-schwarz.com/product/NRPZ91.html>

[3] Hoja de datos en el sitio web:
http://www.metrictest.com/catalog/brands/keithley/kei_3500.jsp

[4] Hoja de datos en el sitio web:
http://www2.rohde-schwarz.com/file_11716/ZVL_QuickStart_ES.pdf

ANEXO B: Generalidades y Configuración de Radio Mobile

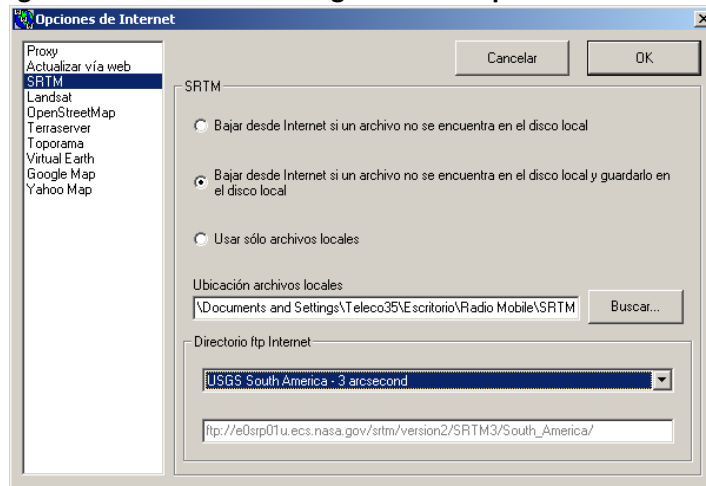
- **Generalidades**

Radio Mobile [1] es un programa de simulación de radio propagación gratuito escrito por Roger Coudé, VE2DBE [2], el cual opera sobre un rango de frecuencias de 20MHz a 20GHz. Está basado en el modelo (Longley-Rice) de propagación ITM (Irregular Terrain Model). Usa el principio de una red de radio, es decir, se especifica los parámetros de desempeño de los dos o más radio transmisores/receptores que se van a comunicar. El programa permite dibujar mapas de elevación de zonas específicas usando los datos bajados de Internet del proyecto de la NASA, *Shuttle Terrain Radar Mapping Misión*. Los mapas con información de elevaciones pueden ser superpuestos a imágenes con mapas topográficos, mapas de carreteras o imágenes satelitales. Además, se pueden especificar parámetros individuales como la frecuencia, la potencia de transmisión, la sensibilidad del receptor, la ganancia, altura y el patrón de la antena, las pérdidas por la naturaleza del cableado, conectores u otros dispositivos.

De la página oficial [1] se puede descargar gratuitamente el programa, consultar tutoriales, ejemplos y demás documentación relacionada.

- **Configuración**

Figura B.1. Ventana de configuración de opciones de Internet.



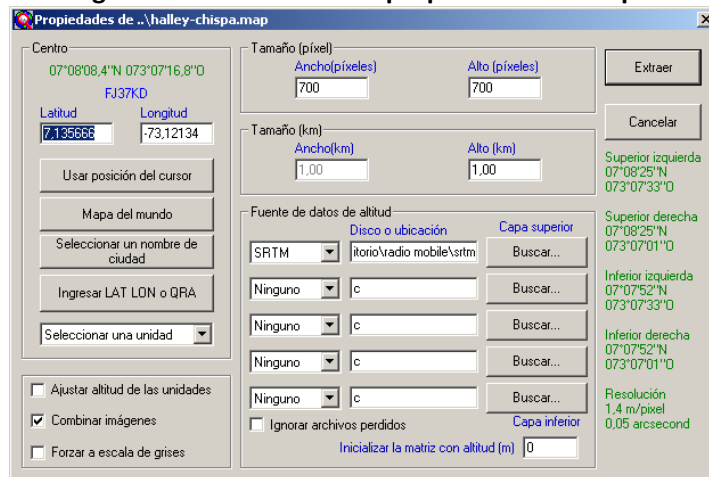
Lo primero que se hace es definir el directorio local en donde se van a guardar los datos de elevaciones descargados, y definir el servidor ftp de donde se va a descargar, en caso de que no se hayan bajado con anterioridad y guardado en el directorio del programa. Por

comodidad y orden de los datos, se recomienda crear una carpeta para cada uno de los diferentes datos con información de mapas, por ejemplo, SRTM, GoogleMap y VirtualEarth. En la figura 1 se muestra la ventana de configuración de estas opciones, a la cual se accede entrando a **Opciones>Internet**

○ **Propiedades de Mapa**

En la ruta **Archivo>Propiedades** de mapa se configura el área donde van a estar ubicada la red y sus miembros. Como se puede observar en la figura 2 en esta ventana se eligen las condiciones para cargar el mapa de la zona de interés, las cuales son: la ubicación de la carpeta local que contiene los datos con las elevaciones, el centro del mapa, el tamaño en píxeles y kilómetros. Una vez definido lo anterior se hace clic en extraer, dependiendo del tamaño y otras opciones toma un tiempo en cargar el respectivo mapa.

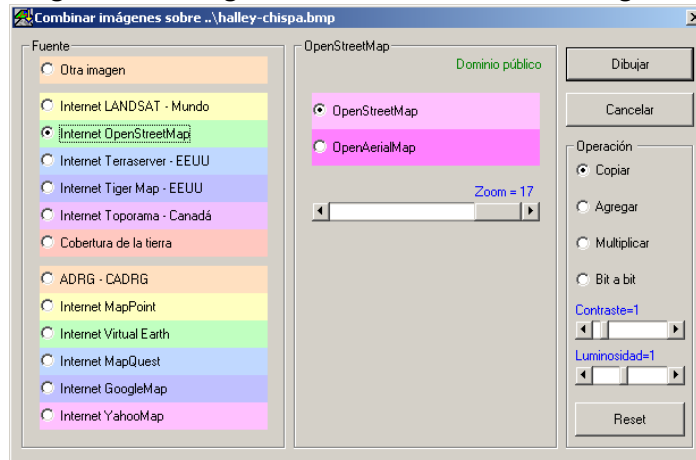
Figura B.2. Ventana de las propiedades del mapa.



○ **Combinar imágenes**

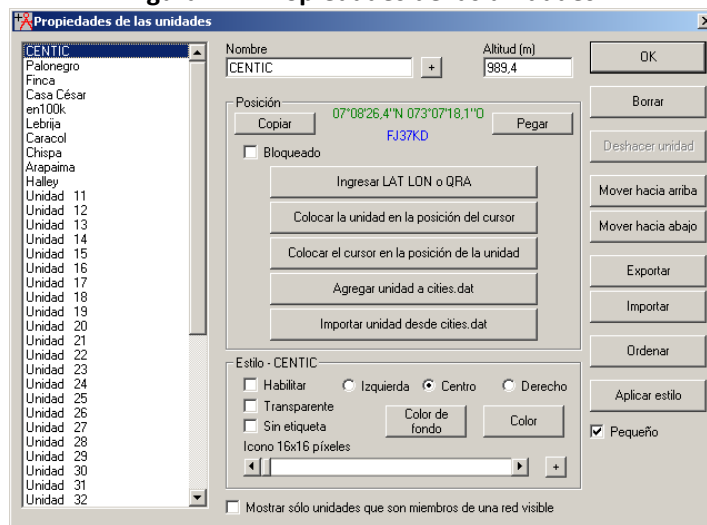
Si se selecciona esta opción en la ventana de Propiedades de mapa, una vez cargado el mapa de elevaciones se abrirá automáticamente la ventana de la figura B.3. Aquí nos muestra diversas opciones para superponer imágenes de satélite o mapas de caminos proveídos por diferentes servidores, en nuestro caso, se escogió Internet OpenStreetMap. En la parte derecha de esta ventana se encuentran las posibles operaciones que se pueden hacer entre el mapa de elevaciones y la imagen descargada, que puede variar entre copiarle sobre el mapa cubriendo la visibilidad del mismo hasta aclararla para que se puedan ver el mapa de elevaciones con las carreteras o el relieve dibujado sobre este como se puede apreciar, por ejemplo en la figura B.3

Figura B.3. Configuración del modo Combinar imágenes



- **Ubicación de las unidades**

Figura B.4. Propiedades de las unidades.



Una vez generado el mapa, se puede proceder a ubicar las unidades, estaciones o nodos. Esta ubicación se hace teniendo un conocimiento previo del terreno, de manera que la ubicación sea lo mas viable posible, para esto podemos encontrar las coordenadas del sitio usando Google Earth, lo cual puede ser útil si estamos ubicados en la ciudad en donde se puede identificar con mayor facilidad un sitio teniendo otros mas visibles como referencia, pero generalmente es preferible usar el GPS, el cual también nos arroja datos como la altitud. Ya sea utilizando uno u otro método o muy seguramente los dos, las coordenadas encontradas se ingresan a Radio Mobile mediante la ruta **Archivo>Propiedades de la**

unidad, la cual nos muestra la ventana de la figura B.4; para mayor exactitud utilizamos el botón **Ingresar LAT LON o QRA**; una vez ingresadas las coordenadas nos muestra la altitud de esa posición y también podemos cambiar cosas como el estilo de la unidad y su nombre. Siguiendo este proceso, ubicamos los demás miembros de la red para luego definir las propiedades de la misma.

○ **Definiendo la red**

Para esto vamos a **Archivo>Propiedades de las redes**, esta acción arroja la ventana de la figura B.5; en la segunda fila de botones se tienen 5 secciones, la primera de ellas, **Parámetros**, es la que muestra esta figura, aquí definimos el nombre de las redes, la frecuencia de operación, entre otros.

Figura B.5. Propiedades de las redes, parámetros.

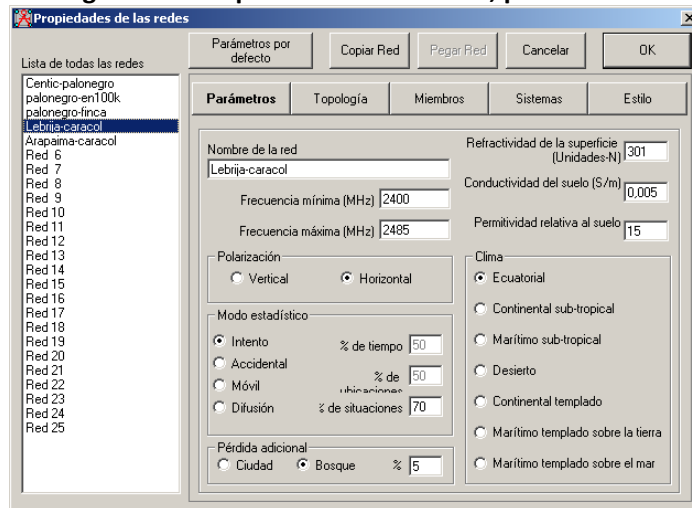
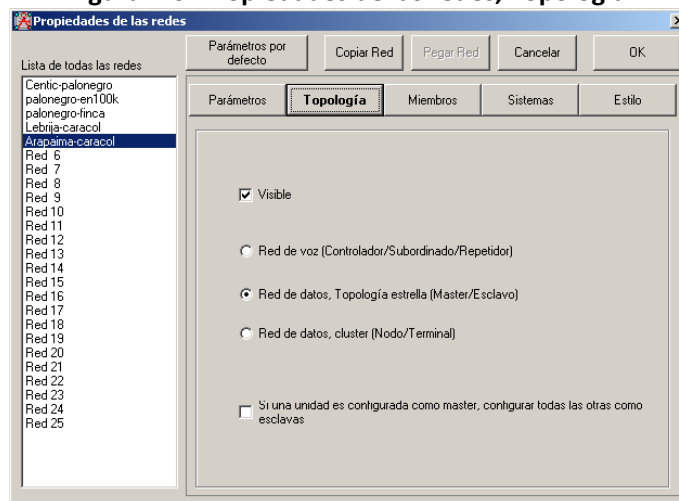


Figura B.6. Propiedades de las redes, Topología.



En la figura B.6 se muestra la configuración del siguiente botón, **Topología**, para nuestro caso se escogió la topología **Maestro/esclavo**. En la figura B.7 se muestra la ventana para el botón **Miembros**; según la red que se esté configurando, escogemos los miembros pertenecientes a la misma, lo que aparecen deshabilitados son los que no se desea que se muestren en el mapa de elevaciones.

Figura B.7. Propiedades de las redes, Miembros.

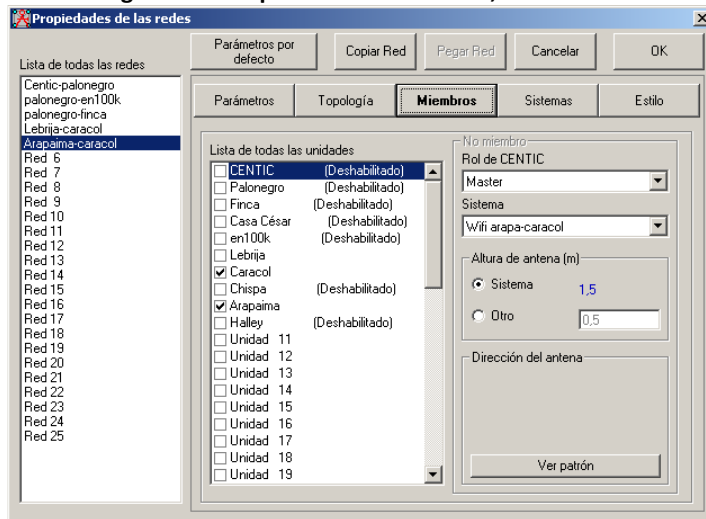
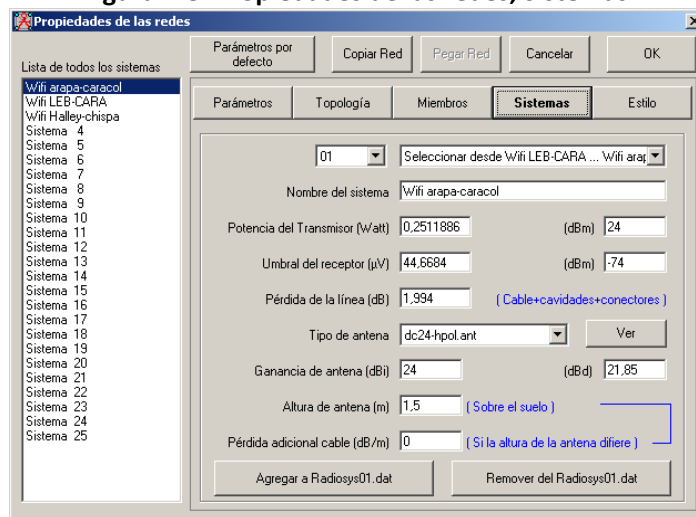


Figura B.8. Propiedades de las redes, Sistemas.



El siguiente botón, **Sistemas**, contiene la información relevante a cada unidad (figura B.8): Potencia del transmisor, umbral del receptor, pérdidas de la línea, ganancia, altura y tipo de la antena, además, pérdida adicional del cable si este se extiende al variar la altura de la antena. En cuanto al tipo de antena en [3] hay una base de datos con diferentes tipos de

patrones de antenas; se escogió el patrón horizontal de una antena parabólica de grilla de 24 dBi, la cuál es utilizada en todas las pruebas de campo. En la figura B.9 se muestra el patrón horizontal de la antena mencionada.

Se pueden crear tantos sistemas como unidades se tengan, pero para nuestro caso se configuró un sistema por cada enlace punto a punto debido a la similitud de las unidades en cada extremo, la única diferencia es la altura de las antenas, pero este parámetro se puede variar en el momento de establecer el enlace. Tomando en cuenta todos los aspectos mencionados en este anexo ya se puede pasar a simular los enlaces.

Figura B.9. Patrón de la antena utilizada en los enlaces a la frecuencia de 2.4GHz.

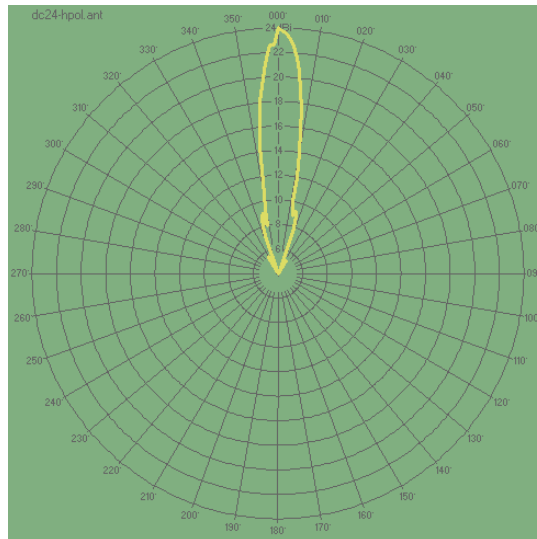
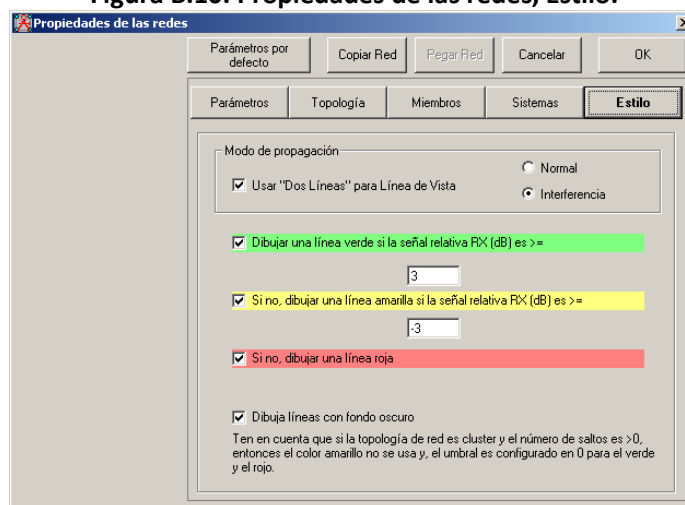


Figura B.10. Propiedades de las redes, Estilo.



REFERENCIAS

- [1] Sitio Web de Radio Mobile: <http://www.cplus.org/rmw/english1.html>
- [2] Localización de VE2DBE: <http://www.qrz.com/db/VE2DBE>
- [3] Pagina oficial de Shelby Wireless. *Base de datos de para los patrones de las antenas.*
Disponible en: <http://www.shelbywireless.com/radiomobile/>