



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERÍA
EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

**AUTORES: ANDREA MISHEL ACOSTA MORALES
VICENTE JAVIER SANDOVAL REYES**

**TEMA: “EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL PROTOCOLO TCP PARA
UN ENLACE INALÁMBRICO DE LARGA DISTANCIA INTER-ISLAS EN
LA REGIÓN INSULAR”**

**DIRECTOR: ING. ROMÁN LARA
CODIRECTOR: DR. GONZALO OLMEDO**

SANGOLQUÍ – ECUADOR

ENERO, 2014

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**PROYECTO DE GRADO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERÍA**

**EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL PROTOCOLO TCP PARA UN
ENLACE INALÁMBRICO DE LARGA DISTANCIA INTER-ISLAS EN LA
REGIÓN INSULAR**

ANDREA MISHEL ACOSTA MORALES

VICENTE JAVIER SANDOVAL REYES

SANGOLQUÍ – ECUADOR

2014

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE
INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

CERTIFICADO

Ing. Román Lara y Dr. Gonzalo Olmedo

CERTIFICAN

Que el trabajo titulado **“EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL PROTOCOLO TCP PARA UN ENLACE INALÁMBRICO DE LARGA DISTANCIA INTER-ISLAS EN LA REGIÓN INSULAR”**, ha sido guiado y revisado periódicamente y cumple normas estatutarias establecidas por la ESPE, en el Reglamento de Estudiantes de la Escuela Politécnica del Ejército.

El mencionado trabajo consta de un documento empastado y un disco compacto el cual contiene los archivos en formato portátil de Acrobat (pdf). Autorizan a **ACOSTA MORALES ANDREA MISHEL** y **VICENTE JAVIER SANDOVAL REYES** que lo entregue al Ingeniero Darío Duque, en su calidad de Coordinador de la Carrera.

Sangolquí, Enero de 2014

.....

Ing. Román Lara

DIRECTOR

.....

Dr. Gonzalo Olmedo

CODIRECTOR

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE
INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

ACOSTA MORALES ANDREA MISHEL

VICENTE JAVIER SANDOVAL REYES

DECLARAMOS QUE:

El proyecto de grado denominado **“EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL PROTOCOLO TCP PARA UN ENLACE INALÁMBRICO DE LARGA DISTANCIA INTER-ISLAS EN LA REGIÓN INSULAR”**, ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de nuestra autoría.

En virtud de esta declaración, nos responsabilizamos del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Sangolquí, Enero de 2014

.....
Andrea Mishel Acosta Morales

.....
Vicente Javier Sandoval Reyes

0703628776

1715466403

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE
INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

AUTORIZACIÓN

Nosotros, ANDREA MISHEL ACOSTA MORALES Y

VICENTE JAVIER SANDOVAL REYES

Autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución del trabajo **“EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL PROTOCOLO TCP PARA UN ENLACE INALÁMBRICO DE LARGA DISTANCIA INTER-ISLAS EN LA REGIÓN INSULAR”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y auditoría.

Sangolquí, Enero de 2014

.....
Andrea Mishel Acosta Morales

0703628776

.....
Vicente Javier Sandoval Reyes

1715466403

DEDICATORIA

A mi Banana, porque transformaste mi vida..

Un cambio hermoso de gran sacrificio,

porque el camino no fue fácil, fue muy duro,

pero TU, con solo pensarte,

con solo escucharte,

con solo una sonrisa..,

me llenabas de fuerzas para alcanzar esta gran meta.

eres el motor para mis noches sin descanso,

cada día de esfuerzo va por ti,

para lograr lo que hoy soy en busca de un mejor futuro,

Te dedico estas páginas para que te sirva de ejemplo mi logro

profesional a lo largo de tu vida.

Mishel

DEDICATORIA

Esta tesis se la dedico a mi Dios y a mi madre Dolorosa por todas las bendiciones recibidas que me han ayudado a culminar esta carrera.

A mis padres, Vicente y Marita, quienes con su amor infinito y el apoyo incondicional tanto emocional, como físico y económico supieron guiarme por el camino de la vida para alcanzar esta meta.

A mis hermanas Gisse y Pao, a mi cuñado Fabricio, a mis sobrinos Michu, Paolita y Gabel que siempre han sabido llenar mi vida con alegría y positivismo. A Liz, quien con su amor y confianza ha sido mi soporte e incentivo para realizarme profesionalmente.

Finalmente, de manera especial, esta tesis y mi vida entera se las dedico a mi ñaña Gabita, y mi sobrina Arianita Sofía, quienes a pesar de ya no estar físicamente a mi lado, desde el cielo me cuidan y acompañan en cada paso de mi vida.

Por todos ustedes, que son el motor de mi vida, éste trabajo y logro profesional se los dedico con el corazón.

Javi

AGRADECIMIENTO

A DIOS por guiar mi camino, bendecirme y darme la fortaleza necesaria en mis momentos de debilidad, y poder hacer realidad este sueño tan anhelado.

A mi mami Chivita por su inmenso amor, por ser mi amiga, por su cercanía, su complicidad y su ejemplo. A mi papi Ramiro por su apoyo durante toda mi carrera, por enseñarme e inculcarme valores, compromiso, fuerza y dedicación. Gracias por brindarme todo su apoyo.

A mi hermana Gaby juntas crecimos, somos cómplices del día a día, amigas incondicionales de toda la vida, gracias por tu infinita paciencia, gracias por compartir todos mis logros.

A mi esposo Andrés por brindarme su ayuda incondicional, por su amor y cuidado, para cumplir esta gran meta juntos.

Al Ing. Román Lara por sus observaciones pertinentes y oportunas durante la investigación, su guía y control permanentes a fin que este proyecto se ajuste a las exigencias, por sus consejos, gracias por ayudarme a crecer como persona y como investigadora. Al Dr. Gonzalo Olmedo por sus enseñanzas y tiempo dedicado a la co- dirección del presente proyecto.

A los profesores quienes durante toda mi carrera universitaria aportaron con un granito de arena y me dejaron enseñanzas que me servirán en toda la vida. A mis amigos que han estado presentes en esta HERMOSA vida universitaria y con los cuales he podido confiar, Vero, Ariel y Javi, a todos gracias por ayudarme a cumplir esta gran meta.

AGRADECIMIENTO

“Muchas veces, a lo largo de un mismo día, me doy cuenta que mi propia vida y sus logros se han construido gracias al trabajo de las personas que me rodean. También comprendo, con cuanta seriedad debo esforzarme para darles, en correspondencia, tanto como he recibido.”

-Albert Einstein

Es mi deseo compartir el pensamiento de Einstein sobre la dicha de estar rodeado de personas maravillosas que han hecho posible cada uno de los pasos que damos y compartir con ellos los triunfos que logramos con su ayuda. Aparte de mi eterna gratitud hacia las personas a quienes está dedicada esta tesis, deseo agradecer a Dios porque con su bendición se ha logrado cumplir esta meta.

Mi gratitud hacia el Ing. Román Lara, director de este proyecto investigativo quien con su ayuda y guía nos supo enseñar el camino correcto para culminar con éxito esta meta. Mis agradecimientos al Dr. Gonzalo Olmedo, co-director de tesis, quien supo ayudarnos a cumplir este objetivo. De igual manera, a todos los profesores que han forjado mi espíritu y dejado una enseñanza positiva en mi vida.

Mi reconocimiento a mi amiga de tesis, Mishel, quien supo sacar fuerzas en todo momento para cumplir este objetivo. A mis buenos amigos de las dos generaciones de la ESPE, del colegio y de la vida, que siempre han estado pendientes y prestos para brindarme su apoyo. Este triunfo alcanzado es gracias a todos ustedes.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICADO	i
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD	ii
AUTORIZACIÓN	iii
DEDICATORIA	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
AGRADECIMIENTO	vii
ÍNDICE DE CONTENIDO	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE TABLAS	xiii
RESUMEN	xiv
ABSTRACT	xv
PRÓLOGO	xvi
GLOSARIO	xviii
CAPÍTULO I	1
1. EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL PROTOCOLO TCP PARA UN ENLACE INALÁMBRICO DE LARGA DISTANCIA INTER-ISLAS EN LA REGIÓN INSULAR..	1
1.1 Introducción	1
1.2 Antecedentes	3
1.3 Objetivos	6
1.3.1 Objetivo General	6
1.3.2 Objetivos Específicos	7
1.4 Alcance	7
CAPÍTULO II	9
2. FUNDAMENTO TEÓRICO	9
2.1 Introducción	9
2.2 Evolución del Estándar IEEE 802.11 - IEEE 802.16	10
2.2.1 IEEE 802.11	10

2.2.2	Redes WiFi para largas distancias.....	15
2.2.3	Limitantes para WiLD en la capa física	17
2.2.4	Limitantes para WiLD en la capa Mac.....	20
•	<i>ACK Timeout</i>	20
•	<i>Slot time</i>	20
•	<i>Network Allocation Vector (NAV)</i>	21
2.2.5	Norma IEEE 802.16 Y WiMAX.....	23
2.3	Comparativa entre WiLD Y WiMAX.....	30
2.3.1	Ventajas y desventajas de WiLD	31
2.3.2	Ventajas y desventajas de WiMAX.....	31
2.4	Arquitectura TCP/IP	33
2.4.1	Arquitectura del Modelo TCP/IP	33
2.4.2	Protocolo de control de transmisión, TCP.....	35
2.4.3	Funcionamiento básico del protocolo TCP	39
2.4.4	Implementaciones del protocolo TCP	49
2.5	TCP en Medios Inalámbricos.....	54
CAPÍTULO III.....		56
3.	MATERIALES Y MÉTODOS	56
3.1.	Materiales	56
3.1.1	Equipos WiLD	57
3.1.2	Equipos WiMAX.....	60
3.1.3	Equipos de radiofrecuencia propietarios.....	67
3.1.4	Entorno de trabajo.....	71
3.2	Métodos.....	83
3.2.1	Configuración de los equipos WiLD.....	84
3.2.2	Modificación en las Tarjetas Alix para largas distancias.....	84
CAPÍTULO IV.....		86
4.	PLANIFICACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE LA RED	86
4.1	Estudio de necesidades	86
4.1.1	Variables de estudio	86
4.2	Estudio de campo	92
4.2.1	Elementos Indispensables.....	93

4.2.2	Herramientas necesarias:	93
4.3	Visita De Campo	94
4.4	Descripción general de la red inalámbrica	96
4.5	Planificación de la red.....	97
4.5.1	La Vertiente - Cerro San Joaquín	98
4.5.2	Enlace Cerro Crocker – Cerro San Joaquín	109
4.6	Selección de los lugares de la red a implementarse.....	115
4.6.1	Cerro San Joaquín (San Cristóbal)	115
4.6.2	Cerro Crocker (Santa cruz)	115
4.7	Validación del diseño de red.	116
4.8	Manejo de equipos	117
4.8.1	Instalación de equipamiento	118
CAPÍTULO V		121
5.	PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	121
5.1	Pruebas y mediciones.....	121
5.2.2	Pruebas de inyección de tráfico.....	123
5.3	Análisis de Resultados:	127
•	Bitrate:	127
•	Jitter:	133
•	Delay:	139
5.4	Propuesta para mejorar el rendimiento del protocolo TCP.....	145
5.4.1	Modelamiento del RTT.....	150
5.4.2	Cálculo del RTT.....	156
CAPÍTULO VI.....		162
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	162
6.1	Conclusiones.....	162
6.2	Recomendaciones	166
Bibliografía		169

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Channel Bonding</i>	15
Figura 2. Modificación en los parámetros de la capa MAC	22
Figura 3. Estructura de capas de la norma IEEE 802.16.....	30
Figura 4. Comparativa entre WiFi y WiMAX	30
Figura 5. Arquitectura del modelo TCP/IP.....	33
Figura 6. Formato del segmento TCP.....	37
Figura 7. Establecimiento de la conexión.....	40
Figura 8. Cierre de la conexión	42
Figura 9. Slow-Start	45
Figura 10. Slow Start y Congestion Avoidance	47
Figura 11. Fast-Retransmit	48
Figura 12. Fast – Recovery	49
Figura 13. Escenario de configuración de los equipos	57
Figura 14. Parte superior Tarjeta Alix	59
Figura 15. Parte inferior de la Tarjeta Alix.....	59
Figura 16. Antena parabólica	60
Figura 17. Descripción del sistema	61
Figura 18. IDU ALB-256 Y ODU	62
Figura 19. Diagrama de bloques del equipo RPT-500.....	65
Figura 20. ETSI EN 300 019-1-3 C3.2 (IDU)	66
Figura 21. ETSI EN 300 019-1-4 C4.1E (ODU)	66
Figura 22. Motorola PTP 58600.....	67
Figura 23. Diversidad de frecuencia.....	68
Figura 24. Diversidad de espacio	69
Figura 25. Formato encabezado TCP modificado	81
Figura 26. Ventana de congestión con NACK.....	82
Figura 27. Ventana de congestión con TCP Reno	82
Figura 28. Ubicación Geográfica de los puntos de interés.....	88
Figura 29. Fotografía Cerro Crocker	89
Figura 30. Estación Científica Charles Darwin	89
Figura 31. Fotografía Cerro San Joaquín.....	90
Figura 32. Parque Nacional Galápagos.....	91
Figura 33. Satelital del Cerro Patricio	91
Figura 34. GPS - distancia entre las Islas	93
Figura 35. Estación Cerro San Joaquín.....	95
Figura 36. Torre Cerro San Joaquín	95
Figura 37. Visita Isla Santa Cruz	96
Figura 38. Perfil de cobertura con 802.11n de 20 MHz.	100
Figura 39. Resultados con 802.11n de 20 MHz.....	100
Figura 40. Resultados con 802.11n de 40 MHz.....	102

Figura 41. Parámetros de cálculo para el modelo de propagación en WiMax.....	105
Figura 42. Perfil de cobertura con WiMAX fijo.....	106
Figura 43. Resultado con WiMAX fijo	106
Figura 44. Enlace Cerro La Vertiente – San Joaquín.....	107
Figura 45. Enlace La Vertiente - San Joaquín.....	108
Figura 46. Parámetros Transmisor.....	109
Figura 47. Resultado con 802.11n de 20 MHz.....	110
Figura 48. Resultado con 802.11n de 40 MHz.....	111
Figura 49. Resultado con WiMAX fijo	112
Figura 50. Enlace Crocker - San Joaquín	113
Figura 51. Perfil del Enlace.....	113
Figura 52. Topología de la red a implementarse	116
Figura 53. Alineación Antena	120
Figura 54. Escenario conceptual de pruebas	122
Figura 55. Selección del Kernel de Linux.....	124
Figura 56. Prueba de Conectividad entre computadoras	124
Figura 57. Inyección de Tráfico.....	125
Figura 58. Inyección de tráfico en la red	126
Figura 59. Tabulación de resultados <i>Bitrate</i>	128
Figura 60. <i>Bitrate</i> a 1 Mbps	129
Figura 61. <i>Bitrate</i> a 2 Mbps	130
Figura 62. <i>Bitrate</i> a 3 Mbps	130
Figura 63. <i>Bitrate</i> a 4 Mbps	131
Figura 64. Consolidado <i>Bitrate</i> para las 3 versiones de TCP	131
Figura 65. Tabulación de resultados del Jitter.....	135
Figura 66. <i>Jitter</i> a 1 Mbps	136
Figura 67. <i>Jitter</i> a 2 Mbps	136
Figura 68. <i>Jitter</i> a 3 Mbps	137
Figura 69. <i>Jitter</i> a 4 Mbps	137
Figura 70. Comparativa de <i>Jitter</i> a 1, 2 ,3 y 4 Mbps en TCP normal y modificado	138
Figura 71. Comparativa del <i>delay</i> a diferentes tasas de transmisión para cada TCP.	140
Figura 72. Delay calculado por D-ITG	141
Figura 73. Histograma Delay a 3 Mbps.	142
Figura 74. Desviación estándar calculada en MatLab a 1 Mbps.....	142
Figura 75. Tabulación de resultados del Delay	143
Figura 76. Diagrama de tiempos.	150

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Velocidades en IEEE 802.11n.....	15
Tabla 2. Clasificación de la capa física de la IEEE 802.16	25
Tabla 3. Características de los estándares 802.16 (a)	27
Tabla 4. Características de los estándares 802.16 (b)	28
Tabla 5. Comparativa entre WiFi larga distancia y WiMAX.....	32
Tabla 6. Características de las Tarjetas Alix.....	58
Tabla 7. Parámetros de configuración de la CPE	65
Tabla 8. Componentes adicionales	66
Tabla 9. Características importantes del Motorola PTP 58600	70
Tabla 10. Características evaluadas para seleccionar la herramienta de inyección de tráfico	72
Tabla 11. Componentes básicos de la plataforma D-ITG.....	73
Tabla 12. Parámetros del modelo SUI.....	77
Tabla 13. Coordenadas de los puntos de interés	87
Tabla 14. Parámetros del transmisor	98
Tabla 15. Parámetros del receptor	99
Tabla 16. Resultados con valores del 802.11n de 20 MHz.....	101
Tabla 17. Resultados con 802.11n de 40 MHz	102
Tabla 18. Condiciones del terreno.....	103
Tabla 19. Resultados con WiMAX fijo.....	107
Tabla 20. Rendimiento del enlace	108
Tabla 21. Resultados con Equipos Motorola La Vertiente – San Joaquín.....	109
Tabla 22. Resultados con 802.11n de 20 Hz.....	110
Tabla 23. Resultados con 802.11n de 40 Hz.....	111
Tabla 24. Resultados con WiMAX fijo.....	112
Tabla 25. Resultados Motorola Crocker - San Joaquín	114
Tabla 26. Direccionamiento Lógico de la red implementada	123
Tabla 27. Resultados del <i>Bitrate</i>	129
Tabla 28. Tabulación de resultados del Jitter	134
Tabla 29. Mejora porcentual del TCP modificado en términos de Jitter.....	138
Tabla 30. Tabulación del Delay calculado con D-ITG y MatLab.....	143
Tabla 31. Error porcentual calculado	143
Tabla 32. Mejora Porcentual del Delay.....	144
Tabla 33. Parámetros de la red	157
Tabla 34. Cálculo del RTT estimado para las diferentes tasas de transmisión	160
Tabla 35. RTT estimado para un enlace a 92 km.....	166

RESUMEN

Este estudio cumple con el objeto de evaluar el desempeño del nuevo algoritmo del protocolo TCP para un enlace inalámbrico de larga distancia inter-islas en la Región Insular. En tal virtud, se partió de un estudio de diferentes tecnologías WiLD, WiMAX y equipos propietarios. La simulación del enlace se realizó mediante SIRENET que facilita la planificación y gestión de redes permitiendo trabajar con diferentes tecnologías y que utiliza una cartografía digital con algoritmos de cálculo avanzados para obtener mayor precisión. También se utilizó el software de simulación para equipos propietarios Motorola, PTP LINKPlanner. Los equipos seleccionados fueron Motorola PTP 58600, seleccionados por las características de potencia, umbral de recepción, además de las regulaciones y facilidades tanto para la instalación de equipos, como para la obtención de los permisos necesarios. Se realizó el estudio de factibilidad, y se seleccionó los Cerros San Joaquín (San Cristóbal) y Crocker (Santa Cruz). Luego se implementó la red y se inyectar tráfico para evaluar el desempeño del protocolo TCP y sus modificaciones para ambientes inalámbricos mediante la inyección de tráfico utilizando D-ITG. Finalmente, se analizó los resultados y se comprobó que el protocolo TCP con ventana de congestión de 15 es el más adecuado, sin embargo, se observó la necesidad de optimizar el mecanismo de detección del tipo de error para mejorar el desempeño de TCP inalámbrico mediante un diseño de comunicación entre capas. Con este fin, se modeló matemáticamente el valor del RTT (*Round Trip Time*) que se debería utilizar para calcular el RTO (*Retransmission TimeOut*) adecuado.

PALABRAS CLAVE: ACK Time Out, NACK, RTO, RTT, TCP inalámbrico.

ABSTRACT

This study meets the purpose of evaluating the performance of the new TCP algorithm for a long distance inter-island wireless link in the island region. In order to achieve this goal, we started from a study of some technologies such as WiLD, WiMAX and proprietary equipment. The link simulation was performed with the software SIRENET which facilitates the planning and management of networks allowing working with several technologies, and using a digital cartography with advanced calculation algorithms for an improved accuracy. Besides Sirenet, the PTP LINKPlanner was also used which is the proprietary software for Motorola equipment. The equipment selected was the Motorola PTP 58600, because of the characteristics of power reception threshold, easy installation of the equipment. A technical site survey was made in order to select the places where the equipment has to be installed; the places carefully chosen were Cerro San Joaquin (San Cristóbal) and Cerro Crocker (Santa Cruz). After the network installation, we proceeded to to evaluate the performance of the TCP protocol and its modifications for wireless environments by injecting traffic using D-ITG. Finally, the results were analyzed and we have found that the TCP congestion window to 15 is the most appropriate protocol. However, the need to optimize the error detection mechanism to improve performance of wireless TCP was observed under a cross layer design. For this purpose, we mathematically modeled the value of RTT (Round Trip Time) that should be used to calculate an adequate RTO (Retransmission TimeOut).

PRÓLOGO

La evolución en el sector de las telecomunicaciones parece ya imparable y emblemática. Se han realizado diversos estándares y tecnologías para las redes inalámbricas, los cuales están cambiando constantemente en busca de una mejor forma de transmisión de datos. Por esta razón se ve la necesidad de contar con un protocolo de red robusto que permita mejorar los procesos de trabajo en calidad, tiempo, costo y eficiencia además que sea capaz de ser utilizado en condiciones no tan favorables como las de un enlace inalámbrico a larga distancia.

En este sentido, la trascendencia de este proyecto de investigación radica en la realización de un análisis comparativo entre el protocolo TCP actual y el nuevo algoritmo del protocolo TCP con la finalidad de determinar el desempeño de una red inalámbrica en un enlace de larga distancia entre dos islas del Archipiélago de Galápagos. Para lograr este objetivo, el presente proyecto de investigación se desarrolló de la siguiente manera:

En el capítulo 1 se encuentra la introducción, alcance y objetivos referentes al proyecto de investigación. En el capítulo 2 se realiza un estudio de los estándares para realizar un enlace a larga distancia, puntualmente en el IEEE 802.11 y el IEEE 802.16. En éste mismo capítulo se realiza un estudio sobre el protocolo TCP y las modificaciones realizadas para su utilización en entornos inalámbricos

El capítulo 3 se detalla los materiales y métodos utilizados en el proceso de diseño, simulación e implementación del radio enlace realizado en las Islas Galápagos. El capítulo 4 es dedicado a las pruebas y mediciones necesarias para

cumplir con el objetivo de evaluar el desempeño del protocolo TCP en ambientes inalámbricos.

El análisis de resultados consta en el capítulo 5. En este mismo capítulo se sugiere una nueva propuesta con el fin de mejorar el desempeño de TCP en ambientes inalámbricos basados en un modelamiento entre capas. Finalmente el capítulo 6 contiene las conclusiones y recomendaciones de éste trabajo investigativo.

GLOSARIO

ACK	<i>Acknowledgment</i> , acuse de recibo
AF	<i>Amplify and Forward</i> , Amplifica y retransmite la señal
AMD	<i>Advanced Micro Devices</i>
ARPA	Agencia de Investigación de Proyectos Avanzados
ARQ	<i>Automatic Repeat Request</i> , protocolos utilizados para el control de errores en la transmisión de datos
ATM	<i>Asynchronous Transfer Mode</i> Modo de Transferencia Asíncrona
BER	<i>Bit Error Rate</i> , Tasa de Error de Bit
BS	<i>Base Station</i> , Estación Base
BW	<i>Bandwidth</i> , ancho de banda
BWA	<i>Broadband Wireless Access</i> , Acceso de Banda Ancha Inalámbrico
CF	<i>Compact Flash</i>
CGG	Consejo de Gobierno de Galápagos
CPE	<i>Customer-Premises Equipment</i>
CSMA/CA	<i>Carrier Sense Medium Access / Collision Avoidance</i>
CTS	<i>Clear To Send</i>
CWND	<i>Congestion Window, Ventana De Congestión</i>
DCF	<i>Distributed Coordination Function</i>
DES	<i>Data Encryption Standard</i> , estándar de cifrado de datos
DFS	<i>Dynamic Frequency Selection</i> , selección de frecuencia dinámica
DIFS	<i>DCF Interframe Space</i>
D-ITG	<i>Distributed Internet Traffic Generator</i>

DMA	<i>Direct Memory Access</i>
DSSS	Espectro ensanchado por secuencia directa
EAP	<i>Extensible Authentication Protocol</i>
ECCD	Estación Científica Charles Darwin
EDCA	<i>Enhanced Distributed Channel Access</i>
EEUU	Estados Unidos
EVM	<i>Error Vector Magnitude</i> cuantifica el rendimiento de un transmisor de radio digital o receptor
FDD	<i>Floppy disk drive</i> , unidad de disquetes flexibles o disquetera
FFT	<i>Fast Fourier transform</i> , Transformada rápida de Fourier
HCCA	<i>HCF-Controlled Channel Access</i>
HFC	<i>Hybrid Coordination Function</i>
HT	<i>High throughput</i>
IDU	<i>Indoor unit</i> equipo interno
IEEE	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos
IP	<i>Internet Protocol</i> , protocolo de internet.
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical</i> , banda usada para esos propósitos
LAN	<i>Local Area Network</i> Red de área local
LOS	<i>Line of sight</i> , línea de vista
MAC	<i>Media Access Control</i> , control de acceso al medio
MIMO	Múltiples entradas, Múltiples salidas
MSDU	MAC servicio de la Unidad de datos
MSS	<i>Maximum Size Segment</i> , Tamaño Máximo de segmento

MTU	<i>Maximum transfer unit</i> , unidad máxima de transferencia
NACK	<i>Negative Acknowledgment</i> , acuse de recibo negativo
NAT	<i>Network Address Translation</i> traducción de dirección de red
NAV	<i>Network Allocation Vector</i> , vector de ubicación de red
NLOS	<i>No Line of sight</i> . Sin línea de vista
ODU	<i>Outdoor Unit</i> , unidad externa.
OFMD	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i> , <i>Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales</i>
OWD	<i>One Way Delay</i> , retardo unidireccional
PDU	<i>Protocol data unit</i> , protocolo de unidad de datos
PHY	Capa física
PIRE	Potencia Isotrópica Radiada Eficaz
Pkm	<i>Private Key Management</i>
PoE	<i>Power over ethernet</i> . Tecnología que transmite datos y energía para el equipo por el mismo cable.
PtMP	Enlace Punto – Multipunto
PTP	Point to Point, enlace punto a punto
QoS	<i>Quality of Service</i> , Calidad de Servicio
RF	Radiofrecuencia
RoHS	La directiva de la Unión Europea (UE) relacionada con la Restricción de determinadas sustancias peligrosas
RTS	<i>Request To send</i>
RTT	<i>Round Trip Time</i> , tiempo que transcurre entre que sale un segmento y

	llega el ACK asociado
RTO	<i>Retransmission TimeOut</i> , tiempo de espera de retransmisión
RWND	<i>receivers advertised window</i>
SACK	<i>Selective ACK</i>
SDM	<i>Security Device Manager</i>
SIFS	<i>Short Interframe Space</i>
SIRENET	<i>Simulation of Radio electricnet works</i>
SS	<i>Security Subcap</i>
SS	<i>Spread Spectrum</i> , espectro ensanchado
SSTHRESH	<i>slow-start umbral del Slow Start</i>
SYN	Sincronización
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TDD	<i>Time-Division Duplexing</i> , duplexación por división de tiempo
TKIP	<i>Temporal Key Integrity Protocol</i>
WEP	<i>Wired Equivalent Privacy</i> es una encriptación para red WiFi
WiFi	<i>Wireless Fidellity</i>
WiLD	<i>Wifi Long Distance</i>
WiMAX	<i>World Wide Interoperability for Microwave Access</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>
WMAN	<i>Wireless Metropolitan Acces Network</i>
WPA	<i>WiFi Protected Access</i>

CAPÍTULO I

EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL PROTOCOLO TCP PARA UN ENLACE INALÁMBRICO DE LARGA DISTANCIA INTER-ISLAS EN LA REGIÓN INSULAR

1.1 Introducción

La evolución de las telecomunicaciones en los últimos años han crecido en forma exponencial y han generado distintas maneras de comunicación, hoy en día gracias a la portabilidad, inmediatez y las diferentes plataformas, se experimentan globalmente cambios vertiginosos, que permiten vivirlos de inmediato frente a una pantalla, lo cual potencia tomar decisiones de inmediato (Albuja, 2011). En este enfoque, las Redes, juegan un papel preponderante ya que las mismas son un lugar para todos y un lugar sin fronteras. Frente a esta demanda global, se han realizado diversos estándares y tecnologías para las redes inalámbricas, los cuales están cambiando constantemente en busca de una mejor forma de transmisión de datos. En el siguiente proyecto se describe la evaluación del desempeño de un nuevo algoritmo de control utilizando tecnologías inalámbricas de telecomunicaciones en la implementación de una red de largo alcance logrando así mejorar la calidad del enlace.

El acceso a la Internet mediante esta convergencia de las tecnologías WiFi y WiMAX ha generado un problema para el cual el protocolo de control de transmisión no fue previsto. Por esta razón se ve la necesidad de contar con un protocolo robusto en la capa de transporte que permita mejorar los procesos de trabajo en calidad, tiempo y costo.

Por este motivo y en virtud de la necesidad de transmisión de datos con un protocolo fiable, surge el requerimiento de alterar el protocolo TCP (*Transmission Control Protocol*), el cual ha sido modificado y corregido en el curso de los años para adaptarlo a las distintas topologías de red. Originalmente el protocolo TCP fue diseñado para funcionar en redes cableadas, por lo que su comportamiento y funcionamiento en redes inalámbricas es diferente (Tanenbaum A. , 2003).

El protocolo TCP no realiza ninguna diferenciación entre pérdidas en un enlace inalámbrico producido por características propias del canal de comunicaciones, de las pérdidas debido a la congestión. En una comunicación punto a punto se asume que las pérdidas ocasionadas son pérdidas por congestión, de manera que resulta en la disminución de la ventana deslizante, provocando una disminución en la tasa de transmisión.

En una comunicación inalámbrica, cada emisor puede determinar la capacidad de la red, basándose en observaciones de la transmisión, mediante los acuses de recibo positivos que llegan ACK (*acknowledgement* - acuse de recibo). El empleo de acuses de recibo regula la transmisión, ya que si llega una confirmación, esto indica que un segmento ha abandonado la red y por lo tanto existe la posibilidad de enviar un

nuevo segmento (Lara, 2012). Cada ACK enviado tiene un tiempo determinado para llegar al destino llamado (ACK Timeout), este tiempo varía según la distancia entre el emisor y el receptor; en una comunicación de larga distancia estos tiempos son insuficientes.

El objetivo de utilizar una herramienta de confirmación de la llegada de los segmentos consiste en prevenir o evitar la congestión, no obstante, el receptor no informa al emisor si existe un descarte de segmento o si llegó con error, y el emisor asume que la pérdida del segmento fue por congestión en la red y causa una disminución en la ventana de congestión. Es decir, disminuye la ventana para la próxima transmisión del segmento causando menores tasas de transmisión. La ventana de control de congestión determina la capacidad de la red al empezar la transmisión y se ajusta a los cambios que se pueden suscitar durante la transferencia de datos.

El principio de funcionamiento recae en la variabilidad del tamaño de la ventana, siendo una ventana menor si la congestión aumenta y viceversa. Por lo tanto, se concluye que el protocolo TCP requiere la modificación del algoritmo de control que permita la adaptación a entornos inalámbricos para que su rendimiento sea optimizado, cuando se ejecuta sobre medios inalámbricos.

1.2 Antecedentes

TCP nació de los trabajos del ARPA (*Advanced Research Project Agency*) del Departamento de Defensa de los EEUU, a través de las universidades y centros de

investigación y actualmente es uno de los principales protocolos a nivel de la capa de transporte. ARPA decidió crear una red de paquetes conmutados que consistía en una subred y varios *hosts*, dando a cada *host* su propio enrutador. En 1969, ARPA logra conectar computadores en las universidades de California - Los Ángeles(UCLA), *Stanford Research Institute* (SRI), Universidad de California Santa Bárbara(UCSB), Universidad de Utah (UTAH), para implementar la primera red no centralizada con el nombre *ARPANET* (Tanenbaum A. , 2003).

En la actualidad las redes troncales y los nodos de interconexión se están expandiendo sin límites, aunque manteniendo una constante que es el protocolo TCP/IP, es por esto que el protocolo TCP/IP ES el estándar en todo tipo de aplicaciones telemáticas tanto redes locales como corporativas, comúnmente conocidas como INTRANET. El protocolo TCP fue creado originalmente para ambientes de red basados en medios guiados, en los cuales la tasa de bits erróneos (BER) es nula o despreciable y por ello que se presume que las pérdidas de paquetes, en su mayoría se deben a la congestión en el medio (Tanenbaum A. , 2003).

Los enlaces inalámbricos son propensos a generar errores, desconexiones temporales y pérdidas de segmentos. La falta de un mecanismo en TCP para distinguir pérdidas ocasionales, de pérdidas por congestión en medios no guiados, resulta en reducciones de la tasa de transmisión y por lo tanto, un bajo rendimiento (Pilo-País, 2011). La pérdida de paquetes normalmente sucede, porque la potencia de recepción se ve reducida debido a las condiciones en el medio de transmisión. La mayor parte de estos problemas derivan del mecanismo de control de congestión propio de TCP. En consecuencia, el protocolo TCP debido a su control de congestión

y pérdida de paquetes, disminuye la velocidad de transmisión de datos, lo que el usuario lo percibe como una degradación de la QoS (Calidad de Servicio) (Meza & Santamaria, 2007).

TCP usa una serie de mecanismos para conseguir un alto rendimiento y evitar la congestión de la red, la idea es enviar tan rápido como el receptor pueda recibir. Estos mecanismos incluyen el uso de la ventana deslizante y algoritmos de control de flujo. El ajuste de parámetros dentro del protocolo TCP como el del temporizador de confirmación, es lo que permite que haya implementaciones para aumentar el tiempo de espera de acuse de recibo (Nolasko, 2012).

Debido a que TCP es un protocolo orientado a la conexión, requiere confirmar la llegada de un paquete (acuse recibo), para proceder a enviar el siguiente. Si el transmisor no detecta un acuse de recibo de algún paquete en un período de tiempo, dicho paquete se retransmite. El número de retransmisiones posibles es limitado, y cuando dicho número alcanza su límite, se comunica el fallo de la conexión a las capas superiores (Casilari, 2006).

Algunos de los trabajos realizados para mejorar el rendimiento del *throughput* de TCP se han enfocado en distinguir entre las pérdidas de paquetes debido a la congestión y a los errores de transmisión. Sin embargo, las soluciones propuestas son generalizadas a las redes inalámbricas y no tienen en cuenta las especificaciones de la capa MAC y la interacción con el mismo. Estos mecanismos están por lo tanto no optimizados para redes inalámbricas en conformación con el estándar IEEE 802.11, donde un primer nivel de corrección de errores se lleva a cabo en la capa MAC.

El proyecto denominado “Implementación y evaluación de un nuevo algoritmo TCP para redes inalámbricas usando *Network Simulator*” realizado en la ESPE, propone modificaciones del protocolo TCP para mejorar el *throughput* y desempeño de la red, lo cual ha resultado una triple mejora de velocidad de transmisión para canales inalámbricos, donde la mayor causa de pérdida de segmentos se debe a la presencia de errores debido al medio de propagación que a la congestión en la red. (Albuja, 2011)

En (Olmedo, 2008) se presenta una propuesta de un nuevo algoritmo del protocolo TCP, el cual se basa en la modificación de la ventana de congestión cuando los segmentos TCP con errores causados por el canal inalámbrico, se reconocen por una confirmación negativa o cuando la memoria intermedia del sistema está llena. El protocolo debe ser capaz de estimar el ancho de banda disponible. En el receptor, el nuevo algoritmo del protocolo TCP para ambientes inalámbricos descarta los segmentos que llegan con error, envía una notificación de error a la fuente, enviando únicamente una confirmación de los segmentos que llegaron satisfactoriamente. Con dicho modelamiento se pretende evitar el decremento de la ventana de congestión y de esta manera optimizar el *throughput* en las redes inalámbricas.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

“Evaluar el desempeño del nuevo algoritmo del protocolo TCP para un enlace inalámbrico de larga distancia inter-islas en la Región Insular”

1.3.2 Objetivos Específicos

- Realizar un estudio del arte del protocolo TCP en sistemas inalámbricos.
- Determinar las características técnicas del equipamiento para el sistema de comunicación inalámbrica a ser utilizado con el fin de probar los cambios realizados a nivel de la capa de transporte en el nuevo algoritmo del protocolo TCP.
- Planificar la red a implementarse en la Región Insular.
- Implementar una red inalámbrica de larga distancia para verificar el comportamiento del nuevo algoritmo desarrollado del protocolo TCP mediante la transmisión de aplicaciones en tiempo real.
- Evaluar el desempeño del enlace a través de la herramienta D-ITG como inyectora de tráfico con la finalidad de obtener mediciones de los parámetros requeridos de calidad de servicio tales como *throughput*, *delay* y *jitter* para garantizar tráfico en tiempo real.
- Analizar los resultados obtenidos en base a la inyección de tráfico para validar el desempeño del nuevo algoritmo desarrollado del protocolo TCP en ambientes inalámbricos para larga distancia en la Región Insular.

1.4 Alcance

La trascendencia de esta investigación radica en poder realizar un análisis comparativo entre el protocolo TCP convencional, sus algoritmos de control de flujo y control de congestión, con el nuevo algoritmo propuesto del protocolo TCP por

(Olmedo, 2008) para determinar el desempeño de una red inalámbrica que permita implementar un enlace de larga distancia inter-islas (Santa Cruz y San Cristóbal) y mejorar significativamente las comunicaciones inalámbricas.

Para tal efecto, el proyecto pretende probar las tecnologías que se encuentran en conformidad con los estándares definidos por la IEEE entre WiFi de larga distancia y WiMAX. Para el cumplimiento de dicho objetivo, se realizará el estudio de los equipos disponibles por el Laboratorio de I+D de la ESPE y se procederá a realizar la planificación de la red inalámbrica a implementar en los lugares determinados para las telecomunicaciones en las Islas Galápagos.

Una vez enlazados los puntos, se pretende evaluar el desempeño de la red con la finalidad de obtener mediciones de los parámetros requeridos para Calidad de Servicio y garantizar tráfico en tiempo real, mediante la herramienta de inyección de tráfico D-ITG. Este procedimiento se lo realizará con los protocolos de red TCP original y del protocolo propuesto TCP.

El presente proyecto culminará con la determinación del desempeño y rendimiento de la red, bajo los diferentes protocolos TCP normal y el nuevo algoritmo desarrollado del protocolo TCP modificado con ventanas de contención de 15 y 20 (Pilo-País, 2011). Mediante dichos resultados se podrá comprobar cuantitativamente en que magnitud los algoritmos propuestos mejoran el desempeño de la red.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1 Introducción

Una red inalámbrica es la interconexión de dispositivos sin necesidad de un medio físico de transmisión (ondas de radiofrecuencia) para compartir recursos entre ellos. En la actualidad las redes inalámbricas proporcionan características importantes para mejorar la productividad, permitir el intercambio de información, y reducir costos. La estandarización de las redes inalámbricas es el eslabón el cual simplifica procesos de prueba y evaluación de productos, reduciendo tiempo de desarrollo y de implementación (Lara & Simó, 2012).

Estas redes deben cumplir estándares genéricos aplicables también a las cableadas pero con especificaciones adicionales que definan la utilización del espectro y aseguren la comunicación entre los equipos. Con estos objetivos se definieron estándares como IEEE 802.11 y IEEE 802.16 comercialmente conocidos como WiFi (fidelidad inalámbrica) y WiMAX (Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas), respectivamente. (Avalos, 2010)

En el siguiente capítulo se presenta las características técnicas, ventajas-desventajas, aplicaciones, limitaciones y comparaciones de WiFi frente a WiMAX poniendo un énfasis en IEEE 802.11 n y IEEE 802.16 -2009.

2.2 Evolución del Estándar IEEE 802.11 - IEEE 802.16

2.2.1 IEEE 802.11

Una red inalámbrica IEEE 802.11 también conocida como WLAN, es una red con características similares a una red LAN usando tecnología de radio frecuencia (RF), las redes WLAN transmiten y reciben datos por el aire minimizando la necesidad de conexiones con cables. El crecimiento y popularidad de las redes WLAN ha sido constante durante estos últimos años, no obstante las redes LAN también han crecido, debido a esto se obligó que existiera una consistencia en todas las redes.

WiFi es el nombre de la certificación otorgada por la WiFi Alliance para certificar productos IEEE 802.11 interoperables con los otros fabricantes. El crecimiento de las redes WiFi es debido a la existencia de hardware comercial accesible, la distribución masiva de routers WiFi, a la versatilidad, al manejo y su economía; es por esto que los sucesivos estándares de redes WiFi representan, en efecto, una alternativa eficaz y de bajo costo para las comunicaciones de banda ancha, especialmente para aquellas arquitecturas que necesitan garantías de calidad de servicio, las cuales han creado la necesidad de mayores velocidades de transmisión y mecanismos de seguridad más eficientes, los cuales han creado que

surja el desarrollo de nuevos estándares para redes inalámbricas los cuales agreguen características que satisfagan las necesidades y expectativas del usuario. (Barnes, 2008)

a. IEEE 802.11a

El estándar 802.11a fue aprobado en 1999. Opera en la banda de 5 GHz y su velocidad máxima de transmisión es de 54 Mbps, la banda de 5 GHz representa una ventaja para este estándar, dado que presenta menos interferencias tomando en cuenta que si tenga línea de vista. Tiene un rendimiento real de aproximadamente 30 Mbps y define la capa física para sistemas que operan con OFDM (multiplexación por división de frecuencia ortogonal), técnica la cual divide una portadora de datos de alta velocidad en varias subportadoras de velocidad más baja, para después ser transmitida en paralelo. (Pozo, 2009) (Ullari & Cruz, 2006)

La subcapa MAC para 802.11a es la misma definida por el estándar 802.11. No puede inter-operar con equipos del estándar 802.11b, excepto si se dispone de equipos que implementen ambos estándares.

b. IEEE 802.11b

Este estándar aprobado en 1999 surge por la necesidad de incrementar la velocidad de transmisión del 802.11, tiene una velocidad máxima de 11 Mbps y trabaja en la banda no licenciada de 2.4 GHz. Para que trabaje a estas velocidades se desarrolló una nueva capa física para adherirla al estándar llamada HR/DSSS (espectro expandido de secuencia directa de alta velocidad) la cual utiliza el

método de acceso CSMA/CA (*Carrier sense multiple access with collision avoidance*) definido en el estándar original.

c. IEEE 802.11e

Este estándar fue aprobado por la IEEE en septiembre de 2005, tiene como objetivo soportar tráfico en tiempo real, mejorar la calidad del servicio en el nivel de la capa de enlace de datos introduciendo nuevos mecanismos para permitir mejores transmisiones de audio y vídeo para lo cual introduce dos tipos de acceso en un sistema de coordinación denominado HCF (*Hybrid Coordination Function*) (IEEE Standard 802.11e, 2005).

- EDCA (*Enhanced Distributed Channel Access*): Sistema distribuido de control. Se basa en prioridades de tráfico.
- HCCA (*HCF-Controlled Channel Access*): Sistema centralizado de control

d. IEEE 802.11g

Fue creada en Junio de 2003, utiliza la banda de 2.4 GHz pero opera a una velocidad teórica máxima de 54 Mbps, o cerca de 24.7 Mbps de velocidad real de transferencia, utiliza WPA (*WiFi Protected Access*) como mecanismo de seguridad. Es compatible con el estándar 802.11b.

e. 802.11h

802.11h fue aprobada en octubre de 2003 y soluciona problemas derivados de la coexistencia de las redes 802.11a, fue creada para cumplir los reglamentos europeos en las redes WLAN para abrir la banda de 5GHz para la cual se crearon

directrices que controlen tanto la frecuencia y la potencia de transmisión mediante dos mecanismos (IEEE, 2003):

- DFS (*Dynamic Frequency Selection*) la cual evita interferencias co-canal permitiéndole al AP que detecte la interferencia y seleccione automáticamente un canal libre.
- TPC (*Transmitter Power Control*) limita la potencia transmitida para que se minimice la interferencia con otros sistemas.

f. 802.11i

Este estándar fue aprobado en el 2004, su objetivo es mejorar la seguridad para protocolos de autenticación y de codificación mediante TKIP (*Temporal Key Integrity Protocol*), es un sistema de encriptación más potente que el sistema WEP

g. 802.11 p

Wireless Access in Vehicular Environments, fue aprobado el año 2010 y utiliza la banda de frecuencias 5.9 GHz (EEUU) y 5.8 GHz (Europa). Comunicación entre vehículos, seguridad vial, señalización, alertas de emergencia, prevención de colisiones en intersecciones, pago de peajes, parking, etc. (Departamento de Sistemas Telematicos y Computacion, 2013)

h. 802.11n

Este estándar fue ratificado por la organización IEEE el 11 de septiembre de 2009, su objetivo principal es mejorar el rendimiento de procesamiento (*HT High*

throughput) consiguiendo tasas de transferencia de hasta 600 Mbps, trabaja en las dos bandas de 2.4GHz y 5GHz, empleando las técnicas de modulación OFDM (usada en 802.11 a/g) y DSSS (usada en 802.11 b). Este estándar utiliza la tecnología MIMO (*Multiple-input Multiple-output*) que permite utilizar varios canales a la vez para enviar y recibir datos, esta tecnología usa múltiples antenas transmisoras y receptoras para mejorar el desempeño del sistema, permitiendo manejar más información que al utilizar una sola brindándole una mayor diversidad y un multiplexado espacial (SDM – *spatial division multiplexing*).

- MIMO utiliza la diversidad de las señales multi-rutas para incrementar la habilidad de un receptor de recobrar los mensajes de la señal.
- SDM puede incrementar significativamente el desempeño de la transmisión ya que aumenta la capacidad del enlace inalámbrico usando varias antenas de transmisión y recepción por las que se transmiten flujos de datos.
- *Channel Bonding*, también conocido como 40 MHz o unión de interfaces de red, es la segunda tecnología incorporada al estándar 802.11n la cual puede utilizar dos canales separados, es decir no solapados, para transmitir datos simultáneamente. Se utilizan dos bandas adyacentes de 20 MHz cada una, por eso el nombre de 40 MHz. Esto permite doblar la velocidad de la capa física disponible en un solo canal de 20 MHz.

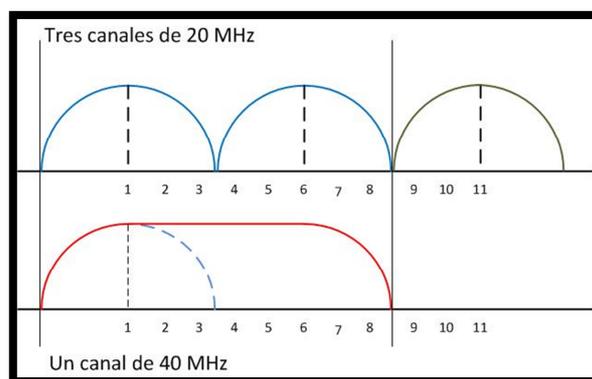


Figura 1. Channel Bonding

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

Velocidades en el estándar IEEE 802.11 n

Tabla 1. Velocidades en IEEE 802.11n

MCS Índice	Modulació n	802.11n Tasa de datos			
		20 MHz		40 MHz	
		L-GI	S-GI	L-GI	S-GI
0	BPSK	6.5	7.2	13.5	15
1	QPSK	13	14.4	27	30
2	QPSK	19.5	21.7	40.5	45
3	16-QAM	26	28.9	54	60
4	16-QAM	39	43.3	81	90
5	64-QAM	52	57.8	108	120
6	64-QAM	58.5	65	121.5	135
7	64-QAM	65	72.2	135	150
8	BPSK	13	14.4	27	30
9	QPSK	26	28.9	54	60
10	QPSK	39	43.3	81	90
11	16-QAM	52	57.8	108	120
12	16-QAM	78	86.7	162	180
13	64-QAM	104	115.6	216	240
14	64-QAM	117	130	243	270
15	64-QAM	130	144.4	270	300

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

2.2.2 Redes WiFi para largas distancias

WiFi es un estándar que no fue realizado para permitir comunicaciones inalámbricas a largas distancias, pero sus indudables ventajas despertó el interés para que este estándar pueda trabajar a mayores distancias modificando algunos parámetros tanto en su capa física como en la capa MAC, lo cual se puede obtener una tecnología WiFi de largo alcance máximo de 300 km utilizando la tecnología IEEE 802.11 n, no obstante el hecho de implementar enlaces para conectar puntos tan distantes entre sí hizo que surjan problemas en varios niveles como son:

- **Limitantes Para WiFi**

Independientemente de la banda de frecuencia en que trabajan, todos los estándares de la subfamilia 802.11 comparten algunas limitaciones (Área de Planificación y nuevas Tecnologías, 2009):

Alcance: hasta 100 metros dependiendo de la ubicación y de la línea de vista entre el punto de acceso y el terminal así como también de las condiciones meteorológicas y de las interferencias.

Ancho de banda: la velocidad útil es mucho menos de la teórica por efecto de los protocolos necesarios para transportar la información de usuario sobre el canal aéreo. En una comunicación el ancho de banda se adapta con el fin de utilizar codificaciones más robustas ante interferencias y/o errores. Es por eso que en ciertas conexiones a un punto de acceso se pueden obtener velocidades de 11 Mbps, otros en 5 Mbps, en 2 Mbps, o incluso, en 1 Mbps.

Calidad de servicio: La consecuencia es que WiFi en su estándar original 802.11 es poco adecuado para transportar tráfico exigente en términos de calidad de servicio.

Seguridad: En un principio, las redes WiFi no presentaban mecanismos de seguridad muy sofisticados, ya que el énfasis se puso en cómo transmitir datos sobre el aire.

Portabilidad: las redes son portables ya que no hay que conectarse desde una ubicación fija para acceder a los servicios que nos ofrece. A causa del escaso alcance de cobertura de un punto de acceso, rápidamente se establece una conexión con otro punto de acceso, la cual cosa implica "saltar" del uno al otro.

2.2.3 Limitantes para WiLD en la capa física

La capa física se relaciona directamente con la radiofrecuencia y propagación de ondas en el espacio, es decir:

Potencia:

Para conseguir un enlace fiable en una red la suma de la potencia de emisión más las pérdidas de propagación y la sensibilidad del receptor debe ser mayor que 0. En una comunicación inalámbrica de larga distancia la señal se atenúa entre un punto, por lo que se debe hacer algo para que el nivel de recepción sea suficiente, el cual se calcula mediante la ecuación de balance.

$$P_{Rx} = P_{Tx} + G_{Rx} + G_{Tx} - L_{cRx} - L_{cTx} - L_a - L_{c_c} - L_p \quad (1.1)$$

Dónde:

P_{rx} = Potencia recibida

P_{tx} = Potencia transmitida

G_{rx} = Ganancia de la antena del receptor

G_{tx} = Ganancia de la antena del transmisor

L_{crx} = Pérdidas de cableado del receptor

L_{ctx} = Pérdidas de cableado del transmisor

L_a = Perdidas por apuntamiento

L_{c_c} = Perdidas por conectores

L_p = Pérdidas de propagación

Perdidas de propagación: Se calcula mediante la fórmula de Friss para que esta ecuación sea válida debe existir línea de vista y que la primera zona de Fresnel esté despejada en un 60 por ciento o superior.

$$L_p(dB) = 92.45 + 20 \log_{10}(f) + 20 \log_{10}(d) \quad (1.2)$$

f = frecuencia en GHz

d = distancian en km

Perdidas por apuntamiento: son pérdidas que afectan directamente a la transmisión debido al margen de error que se produce por la no alineación de las antenas. Se estima que estas pérdidas son 1dB.

Espectro Radioeléctrico: El estándar 802.11n trabaja tanto en el rango de 2.4 GHz como en el de 5 GHz. En el caso del enlace inter-islas a realizarse se utilizó la banda de 5 GHz, ya que es sensible a las condiciones atmosféricas. Se debe tomar en cuenta la presencia de ruido e interferencias.

Fenómenos meteorológicos. En las zonas rurales es frecuente encontrar condiciones meteorológicas adversas. Aunque tradicionalmente se suele decir que las lluvias influyen “de forma sensible” a partir de los 10 GHz, cuando los enlaces son muy largos una pequeña atenuación en dB/km acaba siendo importante. No es un factor muy importante la atenuación de nubes y niebla pero todo depende de la distancia en el enlace. (Camacho, Quispe, Córdova, Liñán, & Chávez, 2009)

Polarización. El mejor comportamiento se da con polarización vertical, pero las condiciones atmosféricas y el terreno pueden producir una cierta despolarización, con lo que la recepción de la señal empeora y su atenuación aumenta.

Interferencias. Si bien en las zonas rurales aisladas esto no suele suceder, al transmitir señales entre dos puntos distanciados por kilómetros, si existe presencia de propagación multi-camino, ésta puede ser muy perjudicial para una recepción óptima.

- **Modificación de parámetros en la capa física**

El estándar IEEE 802.11 permite q la capa física límite la distancia para transmitir, para aplicarlos a larga distancia se debe modificar 5 parámetros que son:

- 1) Aumentar la potencia de transmisión (PIRE)
- 2) Aumentar la ganancia de las antenas
- 3) Disminuir las pérdidas de propagación
- 4) Mejorar la sensibilidad del receptor
- 5) Mínima relación señal a ruido

2.2.4 Limitantes para WiLD en la capa Mac

Se tienen 3 tipos de limitaciones en la capa MAC:

- ✓ El temporizador de espera de los ACK's.
- ✓ La definición de tiempos relacionados con el *Slot time*.
- ✓ Y el cálculo del vector (NAV) que se encarga de controlar el tiempo que se

debe esperar cuando el canal está reservado para la detección de portadora virtual (Cano & Almeida, 2012)

- ***ACK Timeout***

Se define como el tiempo que una estación espera la confirmación o acuse de recibo (ACK) de un paquete que ha mandado antes de darlo por perdido y volverlo a enviar. Para que una comunicación WiFi funcione a una determinada distancia se tiene que cumplir que el *ACK Timeout* sea mayor que el tiempo de propagación de ida y vuelta más el SIFS¹ (*Short Interframe Space*).

- ***Slot time***

Es el tiempo mínimo de ranura necesario para detectar una colisión, donde la estación que transmite es escuchada por el receptor y la señal debe alcanzar su destino antes que este tiempo de ranura termine, tiene un valor por defecto de 20 [us], en largas distancias el tiempo de propagación aumenta cada 6 km, en caso de

¹ SIFS: tiempo fijo que define la separación entre la recepción del paquete de la transmisión de su ACK en el receptor

que el enlace sea mayor a 50 km el efecto no va a ser despreciable ya que existiría retardos y colisiones (Comunidad de Redes, 2011).

- ***Network Allocation Vector (NAV)***

Campo de la cabecera de la capa MAC de la IEEE 802.11 que contiene el tiempo de transmisión necesario para el envío de la trama, es decir el tiempo que el canal estará ocupado mediante la detección de portadora virtual. Las estaciones que permanecen a la escucha del medio, leen este campo de duración y establecen su NAV, el cual indica que durante ese tiempo no pueden transmitir porque otra estación ya lo está haciendo. Debido a que el NAV no se calcula teniendo en cuenta el tiempo de propagación, a medida que la distancia aumenta, su efectividad empeora. En enlaces punto a multipunto con distancias del orden de kilómetros, el RTS/CTS (*Request to send/ Clear to send*) es prácticamente inservible y no hay un mecanismo alternativo. (Hermosa, 2011)

- **Modificación de parámetros en la Capa Mac**

Para que una comunicación inalámbrica funcione debe cumplirse que por cada 300 metros que se aumente en distancia, se añada 1 [us] al *slot time* de un dispositivo y 2 [us] de *ACK timeout*. Cada estación conectada en la red debería tener las mismas constantes de tiempo. (Comunidad de Redes, 2011)

$$ACK_{TO} = T_{MaxP} + SIFS + T_t + T_{minP} \quad (1.3)$$

$$Slottime = D_{MAC} + D_{PHY} + T_{MaxP} \quad (1.4)$$

$$DIFS = SIFS + 2 (Slottime) \quad (1.5)$$

Donde:

ACK_{TO} : ACK Timeout

T_{MaxP} : tiempo máximo de propagación

T_t : tiempo para transmitir $\left(\frac{(14 \times 8)}{bitrate[Mbps]} \right)$

T_{minP} : tiempo mínimo de propagación

D_{MAC} : retardo en capa MAC

D_{PHY} : retardo en capa física

$DIFS$: DCF Interframe Space

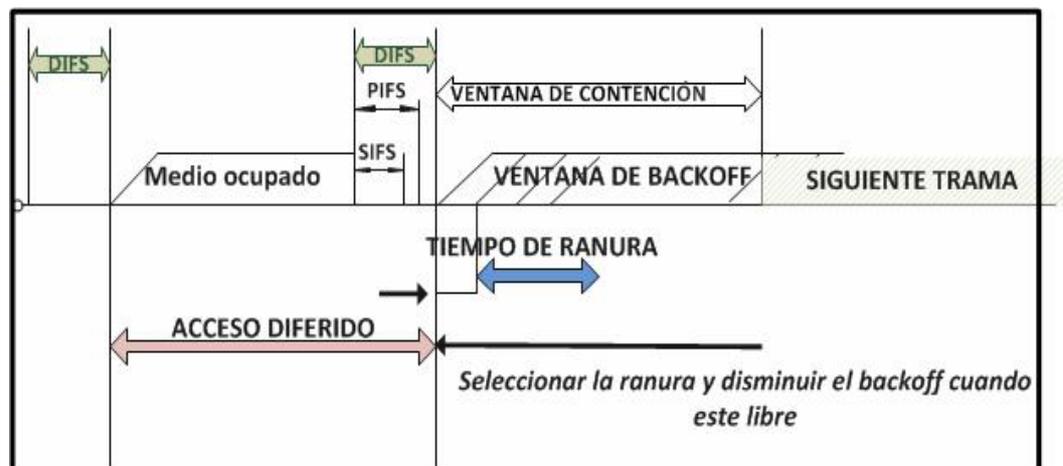


Figura 2. Modificación en los parámetros de la capa MAC

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

2.2.5 Norma IEEE 802.16 Y WiMAX

WiMAX (*World Wide Interoperability for Microwave Access*) es una marca de certificación para los productos que superan los controles de conformidad e interoperabilidad para los estándares de la familia IEEE 802.16. WiMAX parece un concepto parecido a WiFi, y es inevitable su comparación pero son distintas en operación y definición. Este estándar especifica la interfaz de aire en la que se incluye la subcapa MAC y la capa PHY en la cual se proveen múltiples servicios entre estos punto a punto (PtP), punto – multipunto (PtMP), fijos y móviles, además existen en la actualidad dos enmiendas a la norma; IEEE 802.16j que define la interfaz de aire para sistemas de acceso inalámbrico de banda ancha, y IEEE 802.16h que especifica la repetición por multisaltos (Lara & Simó, 2012).

WiMAX soporta fácilmente tasas de datos similares a WiFi pero la influencia de las interferencias disminuye, provee un ambiente regulado, un modelo económico y viable para las portadoras inalámbricas. WiMAX trabaja en las bandas de operación licenciadas de 10 a 66 GHz con canales de ancho de banda de 25 a 28 MHz, con tasas de transmisión teóricas mayores a 120 Mbps. También determina las frecuencias de operación menores a 10 GHz como 5 a 6 GHz siendo bandas no licenciadas, con requerimiento de línea de vista.

WiMAX Forum fue creado en el año 2001 por Nokia Corp., *Ensemble Communications Inc.* y el *Orthogonal Frequency Division Multiplexing Forum*. WiMAX Forum es una organización sin fines de lucro, cuyo objetivo principal es

la interoperabilidad y compatibilidad de productos y servicios basados en el estándar IEEE 802.16/ETSI HiperMAN, permitiendo la práctica de economías de escala introduciendo productos de alta prestación a un precio competitivo.

Se debe tener en cuenta que la tecnología WiMAX, a pesar de estar basada en el estándar IEEE 802.16, no es igual al estándar 802.16 ya que se han aumentado y reducido ciertas características.

WiMAX Forum define a la tecnología WiMAX ciertas características como modulación, ancho de banda, frecuencia de utilización, entre otras, complementando con sistemas de pruebas, arquitectura de red lo que no son cubiertas por la IEEE 802.16, ya que mediante estas se definen los aspectos técnicos operacionales del equipamiento (IEEE 802.16 y WiMAX, 2009). *WiMAX Forum* reduce las características opcionales tanto para la capa PHY como para la capa MAC para facilitar la interoperabilidad entre productos.

WiMAX tiene la capacidad de adaptar su tipo de modulación dependiendo las características específicas del enlace, es decir, para conexiones que se requiere una velocidad de transmisión alta, frente a interferencias, a distancias cortas emplea 64QAM y en condiciones de mayor distancia emplea 16QAM o QPSK con velocidades de transmisión bajas (IEEE 802.16 y WiMAX, 2009).

Dependiendo de la frecuencia que vaya a trabajar la IEEE clasifica las capas físicas en:

Tabla 2. Clasificación de la capa física de la IEEE 802.16

	Banda de Operación	Duplexación	BW del canal [MHZ]	Modulación	Descripción
WirelessMAN-SC Release 1.0	10-66 GHz	TDD FDD	25-28	SCTM (Modulación de única portadora) QPSK, 16 QAM o 64 QAM	LOS (line-of-sight) Portadora simple
Fixed WirelessMAN-OFDM	Licenciadas inferiores a 11 GHz	TDD FDD	1.75-10MHz	BPSK	256 subportadoras
Fixed WirelessMAN-OFDMA	Licenciadas inferiores a 11 GHz	TDD FDD	1.75-20MHz	QPSK, BPSK, 16 QAM o 64 QAM	NLOS 1024-2048 subportadoras
WirelessMAN-OFDMA TDD reléase 1.5	Licenciadas inferiores a 11 GHz	TDD	1.75-20MHz	QPSK, BPSK, 16 QAM o 64 QAM	NLOS
WirelessMAN-OFDMA FDD reléase 1.5	Licenciadas inferiores a 11 GHz	FDD	1.75-20MHz	QPSK, BPSK, 16 QAM o 64 QAM	NLOS
WirelessHUMAN	No licenciadas	TDD	10-20	QPSK, BPSK, 16 QAM o 64 QAM	NLOS

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

Estandarización IEEE 802.16

El proyecto del estándar IEEE se inició en 1998 pero el principal trabajo fue en los años 2000-2003 cuyo objetivo es la transmisión de datos de forma inalámbrica de banda ancha en la última milla, utilizado para el despliegue de redes comerciales de área metropolitana. El radio del área de cobertura estimada es de 15 [km] en condiciones NLOS y de 50 km en condiciones en LOS. Con la norma IEEE 802.16 se proponía resolver las limitaciones fundamentales del

estándar 802.11, como alcance y calidad de servicio (QoS), y tecnología de acceso en exteriores.

Su primera versión creada en el 2001 usaba la técnica de modulación con una única portadora situada en frecuencias entre los 10 y 66 GHz, debido a sus altas frecuencias causaba altas atenuaciones en la señal, para compensar este problema debían utilizarse potencias de transmisión elevadas. En el año 2003 se desarrolló la enmienda IEEE 802.16a usando como esquema de transmisión OFDM. En el 2004 se revisó el estándar ya definiendo el IEEE 802.16-2004 también conocido como 802.16d. (IEEE_802_16_(Wimax).pdf)

En el año 2005 se define el estándar 802.16e lo cual usa Acceso Múltiple por División Ortogonal de Frecuencia (OFDMA), es similar a OFDM. OFDMA agrupa subportadoras múltiples en subcanales. Y por último IEEE 802.16-2009: dando las especificaciones para la Repetición (Conmutación) por multisaltos (*Multihop Relay - MR*). Especifica la interface aérea, incluyendo capa de acceso y control del medio (MAC) y capa física (PHY), combinando sistemas fijos y móviles de acceso PtMP de banda ancha que proveen múltiples servicios.

Tabla 3. Características de los estándares 802.16 (a)

No.	Estándar	Año de publicación	Cobertura	Descripción
1	802.16	abril del 2002	Hasta 50 km	Núcleo del estándar. Requiere LOS. Especifica las capas de radio y MAC para una comunicación PtMP con antenas direccionales y sin movilidad, en el rango de frecuencias de 10 a 66 GHz, ancho de banda por canal de 28 MHz Modulación: QPSK,16QAM,64QAM
2	802.16 ^a	Enero del 2003	Hasta 10 km	Ampliación del estándar 802.16, bandas de frecuencia de 2 a 11 GHz, con sistemas LOS y NLOS, topologías PTP y PMP, ancho de banda de canal de 15-20 MHz, velocidades de hasta 75Mbps, añade soporte para corrección de errores. Modulación: QPSK,16QAM,64QAM
3	802.16c	Enero 2003		Define características y especificaciones en la banda de 10-66 GHz
4	802.16d	Julio 2004	Hasta 50 km según altura de la torre, ganancia en las antenas y potencia de transmisión .	Enfocado en MAC, frecuencias debajo de 11 GHz, topologías PTP y PMP, con sistemas LOS y NLOS, velocidades de hasta 75 Mbps se añade los perfiles aprobados del WiMAX Forum, con OFDM 256subportadoras Modulación: QPSK,16QAM,64QAM

Tabla 4. Características de los estándares 802.16 (b)

No.	Estándar	Año de publicación	Cobertura	Descripción
5	802.16e	Diciembre del 2005	Hasta 5 km	Adapta movilidad, conexión para dispositivos móviles, banda de frecuencias menor a 6 GHz, opera en ambiente NLOS, ancho de banda desde 1.75 hasta 20 MHz, velocidades de 15 Mbps. Modulación: QPSK, 16QAM, 64QAM Subportadoras: OFDMA 1024, 2048
6	802.16j	2009	Hasta 8 km	Introduce mejoras a las especificaciones OFDMA de la capa física y de la capa de control de acceso para permitir su operación y uso en bandas licenciadas.
7	802.16m	2011	Hasta 5 km	<i>WirelessMAN-Advanced</i> o <i>WiMAX-2</i> , capacidad para incrementar la velocidad hasta 1 Gbps.

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

- **Arquitectura De Red**

- **Capa de control de acceso al medio (MAC)**

En esta capa se comprueba los errores de transmisión mediante la validación de las tramas. En el estándar IEEE 802.16 el nivel de MAC comprende 3 subcapas:

1. Subcapa de convergencia
2. Subcapa de parte común de control de acceso al medio

3. Subcapa de seguridad (SS)

Subcapa de convergencia

Esta capa de convergencia realiza toda la transformación de los datos que vienen de la red. Primero acepta las PDU (Unidades de datos de protocolo) entrantes provenientes de las capas superiores, clasifica las MSDU (servicio de la Unidad de datos de la capa MAC) y coloca un identificador de conexión, procesa las PDU de acuerdo a la clasificación, suprime partes repetidas del encabezado antes de enviar, y finalmente entrega las PDU al punto de acceso.

Subcapa de parte común de control de acceso al medio (MAC CPS)

La subcapa de parte común cumple el cargo de brindar una interfaz independiente del medio a la capa PHY, soporta las tres topologías PtP, PtMP y malla. Esta capa cumple el proceso de recibir peticiones y respuestas de asignación de ancho de banda, luego establece la conexión, y finalmente mantiene la conexión entre los dos sitios cumpliendo con calidad de servicio para la transmisión y la asignación de los datos (Soto, 2011).

Subcapa de seguridad (SS)

Esta subcapa de seguridad proporciona autenticación de usuario mediante el protocolo EAP (*Extensible Authentication Protocol*), intercambio de claves secretas, encriptación de datos mediante el algoritmo WEP y control de integridad.

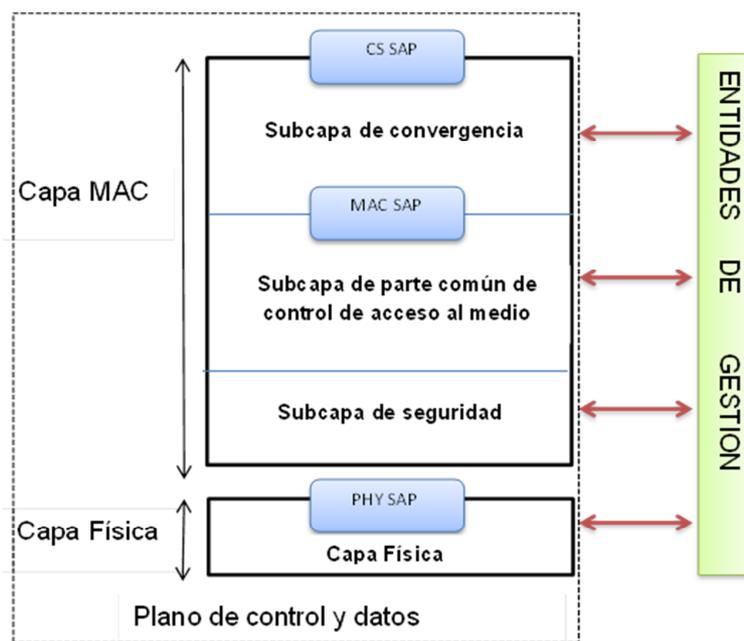


Figura 3. Estructura de capas de la norma IEEE 802.16

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

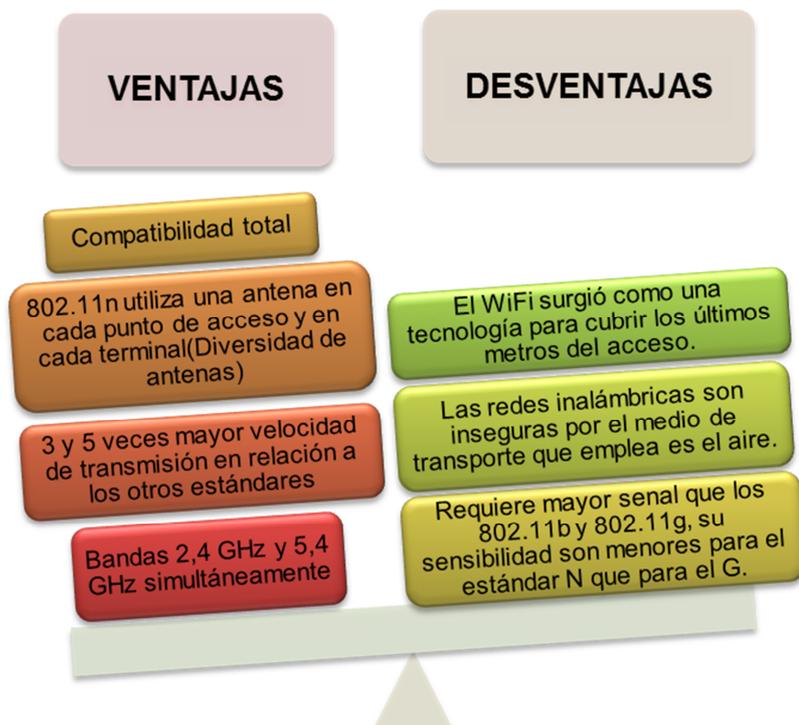
2.3 Comparativa entre WiLD Y WiMAX



Figura 4. Comparativa entre WiFi y WiMAX

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

2.3.1 Ventajas y desventajas de WiLD



2.3.2 Ventajas y desventajas de WiMAX



Tabla 5. Comparativa entre WiFi larga distancia y WiMAX

Parámetro	WiFi larga distancia	WiMAX	
		Fixed WiMAX	Mobile WiMAX
Rango	1-5km	5-80km	1.5-5km
Cobertura	Enlace PtP: máximo 5 km con configuración en los equipos, enlace PtMP: máximo 1km	estándar inalámbrico de banda ancha para uso en exteriores	Diseñado para una topología celular punto-multipunto
Tasa de datos	Teórico: 300 Mbps Real: 100 Mbps	Permite adaptar la velocidad con el ancho de banda del canal disponible.	
		32 Mbps-134.4 Mbps bajada:9.4 Mbps en 3.5MHz subida:3.3 Mbps en 3.5 MHz	1Mbps-75 Mbps bajada:46 Mbps subida:7 Mbps en 10 MHz
Arquitectura MAC	Punto-multipunto Punto-punto	Punto-multipunto Malla	Punto-multipunto Malla
Esquema de transmisión		Única portadora, 256 OFDM o 2048 OFDM	Única portadora, 256 OFDM o escalable con 128,512,1024 o 2048 subportadoras
Frecuencia	2.4GHz 5GHz	3.5GHz Y 5.8GHz	2.3 GHz, 2.5 GHz Y 3.5GHz
Tecnología de radio		TDM/OFDM/OFDMA	TDM/OFDM/OFDMA
Movilidad	Baja	No	Media
Ancho de banda	20/40MHz	3.5MHz y 7MHz en 3.5GHz 10MHz en 5.8GHz	3.5MHz, 5 MHz, 7MHz, 10MHz y 8.75MHz
Calidad de servicio (QoS)	Si requiere calidad de servicio para todas las interfaces	Tráfico de datos <i>best-effort</i> de manera que permite adaptarse a los requisitos QoS de cada conexión de usuario.	Si maneja tráfico DL/UL asimétrico y predispone mecanismos flexibles de asignación de recursos

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

2.4 Arquitectura TCP/IP

El arquitectura TCP/IP (*Transmission Control Protocol / Internet Protocol*) adopta dicho nombre debido a que son los dos protocolos principales en los cuales esta arquitectura de red se basa. El modelo TCP/IP hace posible la comunicación de dos computadores entre sí, desde cualquier parte del mundo casi instantáneamente. Esta arquitectura fue planteada con el objetivo de hacer posible la interconexión de redes de distintas naturalezas (satelitales, de radio, cableadas, etc.), facilitando el intercambio de información, siendo independiente de la tecnología, es decir brindando una comunicación transparente entre diferentes sistemas. Para lograr dicho objetivo, la arquitectura TCP/IP utiliza cuatro capas que son: Aplicación, Transporte, Internet y Acceso a la Red, como se indica en la Figura 5. A continuación se brinda una breve explicación de las funciones de cada capa. (Toapanta Banda, 2006) (Vasquez Herrera, 2001)

2.4.1 Arquitectura del Modelo TCP/IP



Figura 5. Arquitectura del modelo TCP/IP

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

- **Capa de Aplicación:** es la capa que interactúa con el usuario, es aquí donde el usuario utiliza los diversos protocolos para comunicarse con la red. Maneja los protocolos de alto nivel, aspectos de representación, codificación y control de dialogo. Se incluyen protocolos destinados a proporcionar servicios, como por ejemplo transferencia de ficheros, correo electrónico, conexión remota, transferencia de hipertexto.

- **Capa de Transporte:** los protocolos de este nivel se encargan de brindar a la capa de aplicación un flujo de datos entre máquinas y proporcionar la fiabilidad necesaria en el transporte de los mismos, se refiere a los aspectos de calidad de servicio con respecto a la confiabilidad, el control de flujo y la corrección de errores. Los protocolos utilizados en esta capa son TCP y UDP.

- **Capa de Internet:** esta capa envía paquetes desde el host de origen a cualquier red independiente de la ruta y de las redes utilizadas para llegar hasta el destino. El protocolo específico que rige esta capa se denomina Protocolo de Internet (IP). En esta capa se produce la determinación de la mejor ruta y la conmutación de paquetes. Esta capa se encarga también del ruteo de los paquetes y de evitar la congestión.

- **Capa de Acceso a la Red:** transmite bits por un canal de comunicación y entre sus funciones se encuentran: definir las características físicas y eléctricas, manejar los voltajes y pulsos eléctricos, además de especificar cables, conectores y componentes de interfaz con el medio de transmisión.

2.4.2 Protocolo de control de transmisión, TCP

Es un protocolo de transporte de comunicación estándar, definido en el RFC-793 (Postel, 1981) y actualizado en el RFC-6528 (Gont, 2012). Entre sus características principales se encuentra que es un protocolo orientado a conexión brindando un servicio seguro. El protocolo TCP es el responsable de garantizar una comunicación de dos sistemas que sea libre de errores, sin pérdida de paquetes y con seguridad; para lograr este objetivo, TCP proporciona: transferencia básica de datos, fiabilidad, control de flujo, multiplexación, conexiones lógicas, full dúplex, prioridad y seguridad (Fernández Hernández & Tavares Calafate, 2012).

- Transferencia básica de datos: La capa de aplicación entrega a la capa de transporte (protocolo TCP) la información (bytes) a enviarse a la red. TCP envía los datos en el momento apropiado de manera binaria en segmentos de octetos, y los entrega a la capa de internet (protocolo IP) para ser despachados al destino.
- Fiabilidad: TCP utiliza un número de secuencia a cada byte transmitido, y exige un acuse de recibo, ACK (“*acknowledgment*”) del módulo de TCP receptor. Estos números de secuencia sirven para recuperar la información en caso de que se hayan corrompido, perdido, duplicado o desordenado los segmentos TCP. Cuando el emisor no recibe un ACK en un cierto tiempo, considera que el segmento se ha perdido y procede a reenviarlo. En el receptor, el número de secuencia sirve para ordenar, re ensamblar la información y eliminar los mensajes duplicados. Además, como los datos se transmiten en segmentos TCP, solo el número de secuencia del primer

byte de datos en el segmento es enviado al receptor. Para evitar datos corrompidos, se añade un *checksum* (“suma de control”) a cada segmento transmitido.

- Control de flujo: Mediante el control de flujo el receptor informa al emisor el número de bytes que puede recibir de acuerdo a su buffer interno. El control de flujo es conocido como la “ventana deslizante”.
- *Multiplexing*: permite que muchos procesos dentro de un mismo “*host*” utilicen la comunicación TCP mediante una serie de direcciones o puertos dentro de cada “*host*”, formando un “*socket*” o dirección de conector.
- Conexiones lógicas: es la combinación de información de inicialización de TCP y del estado, incluyendo los “*sockets*”, los números de secuencia y los tamaños de las ventanas deslizantes.
- Full *dúplex*: brinda servicio de comunicación en ambas direcciones.
- Prioridad y seguridad: de acuerdo a la aplicación se puede indicar dichos niveles de prioridad y seguridad de la comunicación.

Formato del segmento TCP

El transmisor y receptor intercambian información en forma de segmentos. El formato del segmento TCP tiene un encabezado mínimo de 20 bytes formado por los siguientes campos: puerto origen y puerto destino, número de secuencia, número de confirmación, longitud de la cabecera, campo reservado, código o banderas (URG, ACK, PSH, RST, SYN, FIN), tamaño de la ventana, suma de verificación, puntero de urgente, opciones y datos como se indica en la Figura 6. El encabezado contiene toda la información requerida para el control de la

transmisión, el estado de una conexión y la integridad del encabezado (Seth & Venkatesulu, 2008) (Liu & Carolyn, 2006; Castillo, 2005; González Casado, 2012)

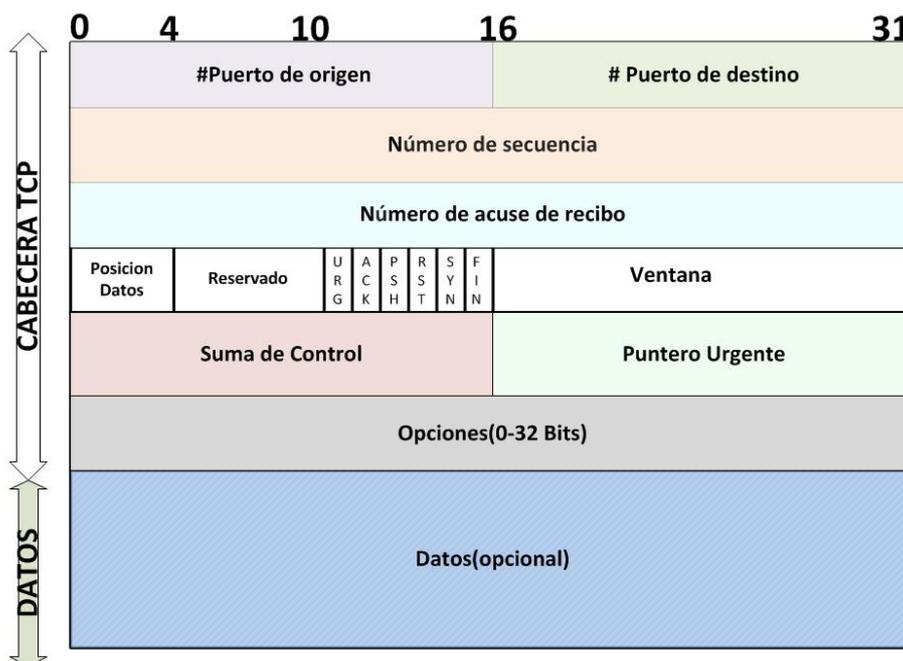


Figura 6. Formato del segmento TCP

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

Los campos Puerto origen y Puerto destino identifican, junto a las direcciones origen y destino del paquete IP, la conexión a la que pertenece el segmento. Cada uno es de 16 bits. (Moreno Vozmediano, Montero, & Fabero Jiménez)

El campo **Número de secuencia** (*Sequence number*) es de 32 bits, indica el orden dentro de la transmisión, del primer byte de datos contenido en el segmento. Junto al tamaño total del paquete IP, que permite conocer cuántos bytes de datos se reciben, es posible determinar cuál será el número de secuencia del siguiente segmento.

El campo **Número de confirmación** (*Acknowledgement number ACK*) es de 32 bits e indica el valor del próximo número de secuencia esperado. Esto implica que todos los bytes transmitidos en segmentos anteriores han llegado de forma satisfactoria. Sólo es significativo cuando el bit ACK del campo Código está a 1.

El campo **Longitud de la Cabecera** indica cuántas palabras de 32 bits (4 bytes) componen la cabecera TCP. El tamaño mínimo del campo es 5 (la cabecera ocupa $5 \times 4 = 20$ bytes) y el máximo será de 15 ($15 \times 4 = 60$ bytes).

Los **Campos Reservados**, que por omisión deben estar a cero, tienen un total de 6 bits. Fueron creados para nuevas características y uso futuro.

El campo **Código** o **Banderas** consta de seis bits, teniendo cada uno de ellos un significado independiente del resto:

- URG: El puntero de urgente está activado.
- ACK: El segmento es una confirmación. El campo número de confirmación es válido.
- PSH: Indica al receptor que envíe los datos a la aplicación sin almacenarlos en el buffer.
- RST: Reinicia o restablece la conexión debido a una caída en un host.
- SYN: Utilizado para establecer conexiones y aceptar conexiones.
- FIN: Indica que el emisor llegó al final de su secuencia de datos, es decir, no existen más datos a transmitir desde el origen y se procede a liberar la conexión.

El campo **Ventana** (*Window*) es de 16 bits e indica el número de bytes que el receptor es capaz de recibir, es decir, el espacio en memoria disponible en el receptor. Este campo limita la ventana de transmisión del emisor del segmento, limitando el número de bytes que puede transmitir sin recibir reconocimientos.

El campo **Suma de Comprobación** o *Checksum* contiene un código detector de errores.

El campo **Puntero de Urgente** son 16 bits que permiten, junto al bit URG, la transmisión de datos urgentes no sujetos al control de flujo.

Finalmente, pueden existir una o varias **Opciones** de 32 bits, que permiten gestionar aspectos como el tamaño máximo de segmento, los reconocimientos selectivos, es decir características adicionales que no se encuentran en el encabezado normal.

2.4.3 Funcionamiento básico del protocolo TCP

Al ser TCP un protocolo orientado a la conexión, es preciso establecer una sesión entre emisor y receptor previo al envío de información. Las operaciones del protocolo TCP se pueden dividir en tres fases: establecimiento de la conexión, transferencia de datos y cierre de la conexión.

- **Establecimiento de la conexión:** Utiliza el método “*three-way handshake*” o acuerdo de tres pasos. Para establecer la conexión es necesario realizar los 3 pasos:

- a. El cliente transmite un segmento SYN al servidor estableciendo un número de secuencia del segmento a un valor aleatorio X
- b. El servidor responde un segmento SYN – ACK, con un número de reconocimiento $X+1$. El número que el servidor elige para el paquete es otro número aleatorio Y
- c. El cliente responde con otro ACK y la secuencia del segmento se establece en el valor $X+1$ y el número de reconocimiento a un valor $Y+1$.

Con este procedimiento se ha recibido un reconocimiento de la conexión para que quede establecida y lista para la transferencia de datos. Este procedimiento se lo visualiza en la Figura 7:

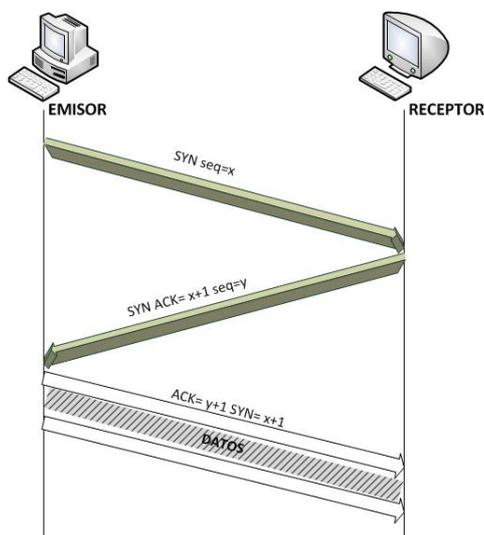


Figura 7. Establecimiento de la conexión

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

- **Transferencia de Datos:** TCP permite el intercambio de bytes entre emisor y receptor. La capa de aplicación envía datos a TCP en forma de flujo de datos (bytes), TCP divide el flujo de datos en segmentos para que puedan ser transmitidos hacia el receptor. Este procedimiento garantiza su transmisión y multiplexación en el medio. El tamaño de los datos encapsulados no puede ser superior al MSS y debe estar en el límite de la unidad máxima de transferencia (MTU) (Pilo-País, 2011).

- **Cierre de la conexión:** Utiliza la negociación en cuatro pasos “*four-way handshake*”. Se establece que cada lado de la conexión termina de manera independiente. Cuando cliente o servidor quiere terminar su conexión, transmite un paquete FIN, al que el otro extremo responde con un reconocimiento, ACK. Cuando el otro desee terminar su conexión, igualmente enviará un FIN, esperando una respuesta ACK. Con esto se libera completamente la conexión y los puertos utilizados. Este procedimiento se visualiza en la Figura 8:

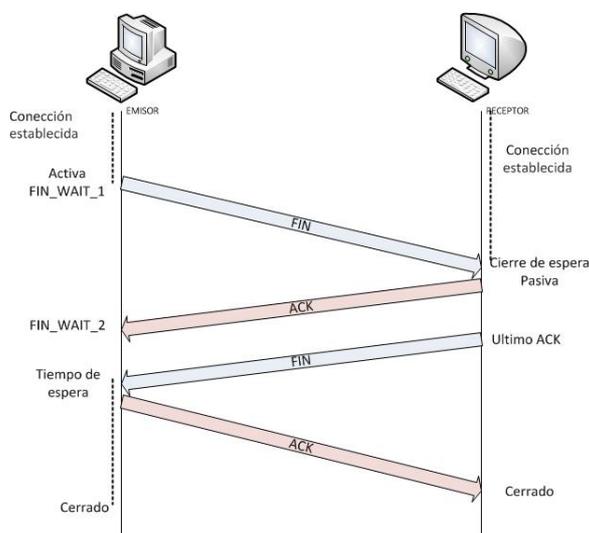


Figura 8. Cierre de la conexión

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

Control de flujo en el protocolo TCP

El control de flujo en TCP es de extremo-a-extremo “*end-to-end*”, evitando que el emisor envíe demasiados datos respecto a la capacidad del receptor de recibirlos y procesarlos de manera fiable. El éxito del control de flujo reside en la optimización del uso del canal. Se realiza a través del mecanismo de la ventana deslizante. El receptor envía los ACK's con un valor del tamaño de la ventana indicando el número de bytes que el emisor puede despachar en cierto momento. Este valor toma el nombre de ventana anunciada y corresponde al tamaño del buffer de recepción de la entidad receptora. El emisor puede enviar máximo hasta esa cantidad de datos antes de recibir un nuevo ACK para actualizar la capacidad del buffer del receptor.

Si el receptor envía una ventana con valor 0, indica que el buffer está lleno y el emisor no debe enviar datos. El emisor inicia un temporizador de persistencia que es utilizado para proteger la conexión, mientras se espera una actualización con un tamaño de ventana diferente de cero. Si el temporizador expira, el emisor envía un paquete de prueba para comprobar si el receptor tiene capacidad para recibir más datos.

Si la ventana es pequeña repetidamente, se inicia un control de flujo lógico, definido en RFC-896 y consiste en esperar un poco de tiempo la transmisión de datos hasta que se puedan enviar más bytes por paquete, ya que es ineficiente enviar pocos bytes de datos en cada segmento TCP (Nagle, 1984).

Control de congestión en el protocolo TCP

Para el control de la congestión TCP se basa en la regulación del tráfico inyectado a la red, implementa funciones que permiten estudiar cuándo es posible enviar más tráfico por el enlace, o cuándo se ha superado la capacidad del mismo y se debe disminuir la carga. Los problemas de la congestión en las redes causan un aumento del retardo, *jitter*, la retransmisión de paquetes, disminución del *throughput* y de las ventanas anunciadas con valores cercanos a cero (Nagle, 1984).

El control congestión en TCP se definió en el RFC-2581 (Allman, Software, & Paxson, 1999), con cuatro algoritmos básicos: “*slow-start*”, “*congestion avoidance*”, “*fast retransmit*” y “*fast recovery*”. Estos algoritmos fueron estandarizados en (Braden, 1989).

1. *Slow Start*

Este algoritmo evita la pérdida de paquetes producida por hosts intermedios entre el origen y el destino, los cuales no tienen capacidad de manejar un flujo de segmentos a transmitirse. Para esto se cuenta con dos variables de estado: *CWND* (*congestion window*), que controla del lado de la fuente la cantidad de datos que se puede enviar sin haber recibido un ACK y *RWND* (*receivers advertised window* o ventana anunciada) que indica la cantidad de datos que puede recibir el destino (Stevens, 1997).

Una vez establecida la conexión, cada vez que se recibe un ACK, la ventana de congestión se duplica por cada RTT. El emisor enviará el menor valor entre la ventana de congestión y la ventana anunciada. Esto explica que con la ventana de congestión, el emisor percibe la congestión de la red, mientras que con la ventana anunciada, el emisor conoce la cantidad de espacio disponible en el buffer del receptor. Cuando el emisor ha alcanzado la capacidad de la red, se empezará a descartar paquetes. En la Figura 9 se muestra el funcionamiento del *Slow-Start*.

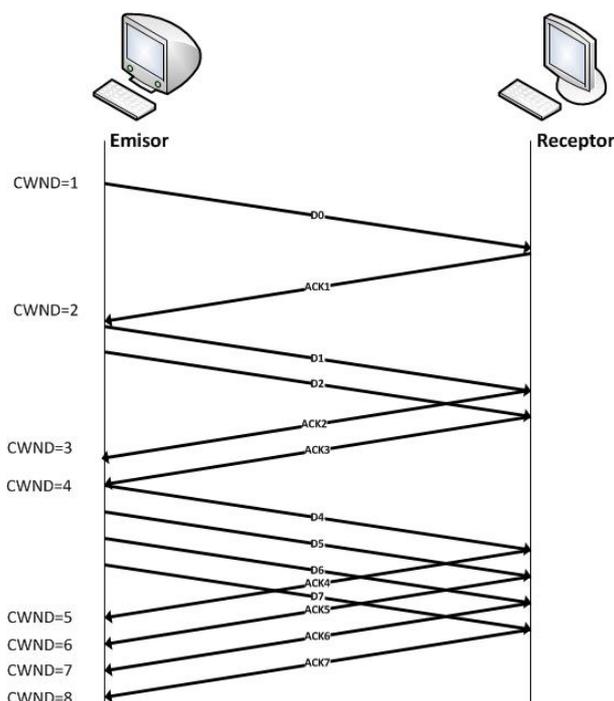


Figura 9. Slow-Start

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

2. *Congestion Avoidance*

Siendo el protocolo TCP originalmente creado para redes cableadas, la probabilidad de que la pérdida de un paquete se debe a algún problema de transmisión es mínima, por lo tanto, asume que cualquier pérdida de paquetes se debe a la congestión. Existen 2 maneras de detectar la pérdida de un paquete: mediante la expiración de un temporizador o cuando se reciben ACK's duplicados (Stevens, 1997).

Para la implementación del *Congestion Avoidance*, se implementó otra variable de estado que es el Ssthresh "*slow-start threshold*" o umbral del

slow-start. Aunque *slow-start* y *congestion avoidance* son independientes, se implementan juntos. Mientras que *slow start* incrementa exponencialmente, *congestion avoidance* lo hace linealmente a partir del umbral.

El algoritmo *slow start* es utilizado al comienzo de una transmisión a los efectos de que TCP pueda testear la red y conocer su capacidad evitando congestionarla. También es utilizado en el momento de recuperación ante la pérdida de algún segmento, indicada por la expiración de un temporizador.

Después del *three-way handshake*, el tamaño de la ventana inicial de envío por lo general se fija en un segmento. El valor de *ssthresh* debería ser lo más alto posible al comienzo (por ejemplo, igual a *cwnd*) y deberá reducirse en caso de congestión. Durante la fase *slow start* se aumenta *cwnd* por cada ACK recibido de datos nuevos entregados al receptor. Esta fase culmina cuando *cwnd* alcanza a *ssthresh* o cuando se detecta congestión.

A partir de allí se inicia la fase de *congestion avoidance* donde *cwnd* se incrementa en un segmento por cada RTT. Esta fase continúa hasta que se alcanza la congestión nuevamente. En la Figura 10 se muestra el comportamiento de estos 2 algoritmos, primero el *Slow Start* con crecimiento exponencial, mientras que cuando se llega al nivel del umbral o *ssthresh*

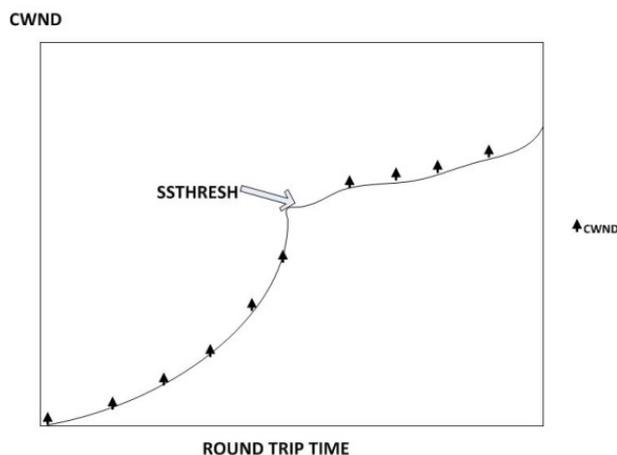


Figura 10. Slow Start y Congestion Avoidance

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

3. *Fast Retransmit*

Explicado en el RFC 2001, evita que el protocolo TCP espere la expiración del temporizador para reenviar segmentos perdidos. Cuando el receptor recibe mensajes en desorden, envía ACK's duplicados, haciendo saber al emisor que se están recibiendo paquetes fuera de orden y cuál es el paquete que se esperaba. Si el emisor recibe un total de 4 ACK's idénticos, se considera que un segmento se ha perdido. En este caso, TCP retransmite el segmento perdido sin esperar a que el temporizador de retransmisión expire (Stevens, 1997). En la Figura 11 se muestra el funcionamiento de este algoritmo:

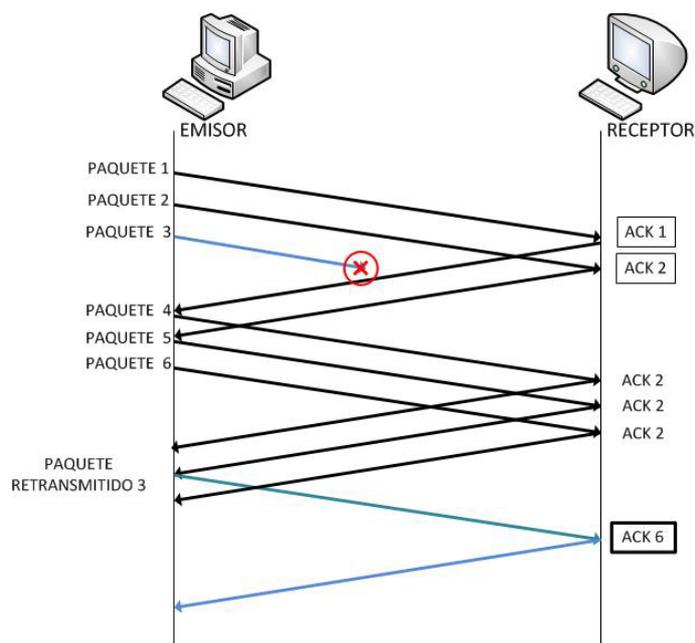


Figura 11. Fast-Retransmit

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

4. *Fast Recovery*

Este algoritmo se basa en que después de haber retransmitido el segmento perdido mediante *fast retransmit*, se realiza el mismo proceso de *congestion avoidance*, en lugar del original *slowstart*. A diferencia de *congestion avoidance* el valor de la CWND será la mitad del último valor máximo alcanzado y el crecimiento de la ventana continúa de forma lineal (Stevens, 1997). Con este mecanismo, se logra un mejor rendimiento cuando haya congestión en una red, especialmente en ventanas de gran tamaño, el procedimiento se lo puede ver en la Figura 12.

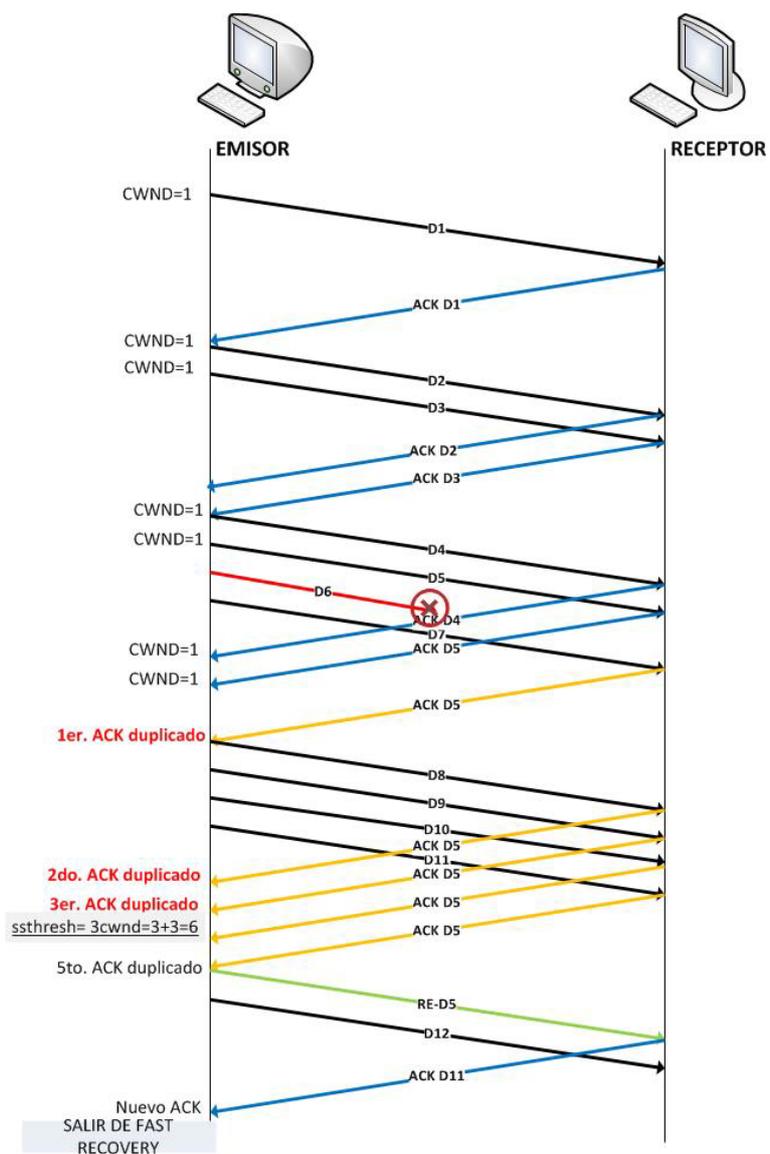


Figura 12. Fast – Recovery

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

2.4.4 Implementaciones del protocolo TCP

El protocolo TCP, aparte de ser un protocolo complejo, se basa en múltiples implementaciones que se encuentran disponibles en los distintos sistemas

operativos más que en una única especificación. A lo largo de los años se ha ido implementado muchas mejoras, sin embargo, las operaciones más básicas no han variado significativamente desde la primera especificación. El elemento principal en el protocolo TCP es el algoritmo de control de la congestión, siendo la base para controlar la congestión en Internet. (Fernández Hernández & Tavares Calafate, 2012; Rodríguez & Vidal, 2004)

- 1983: primera versión ampliamente disponible de TCP/IP.
- 1986: mejor rendimiento de TCP.
- 1988: Tahoe: “*slow start*”, “*congestion avoidance*”, “*fast retransmit*”.
- 1990: Reno: “*fast recovery*”, predicción de cabeceras TCP, cabecera SLIP, compresión.
- 1993: multidifusión, modificaciones para canales de alto rendimiento
- 1994: Lite: utiliza la implementación base TCP Reno.

La evolución del protocolo TCP toma como base el TCP – Tahoe, deriva en TCP – Reno y finalmente en TCP – Lite. La versión de TCP – lite ha sido la base para el desarrollo de los sistemas actuales como por ejemplo New-Reno (RFC 6582, versión de Reno mejorando “*fast retransmit*”, Reno Plus popular en sistemas Solaris, y SACK (“*Selective ACK*”), que utiliza reconocimientos selectivos). Los reconocimientos selectivos positivos son una opción en TCP (RFC 2018).

- **TCP –Tahoe:** Desarrollado en 1988 cuenta con los algoritmos *slow start*, *congestion avoidance* y luego se agregó un proceso de *fast retransmit*. Se basa en

el principio de “conservación de los paquetes”, que implica que cuando se está enviando paquetes con el ancho de banda disponible, no se puede enviar otro paquete hasta que algún paquete haya salido de la red. Su gran desventaja es que cuando se pierde un segmento, se inicia nuevamente la etapa de *slow start* tardando mucho tiempo para llegar a tasas de transmisión aceptables.

Cuando se reciben tres ACK's duplicados Tahoe ejecuta *fast retransmit*, reduce la ventana de congestión a 1 MSS (*máximo segmento size*) y reinicia al estado de *slow start*.

- **TCP – Reno:** Aparece en 1990 y es la versión más utilizada actualmente. A diferencia de la versión anterior es que cuando se detecta congestión, TCP – Tahoe vuelve a la etapa de *slow start*, mientras que TCP – Reno utiliza el umbral *ssthresh* regresando a la fase de *congestion avoidance*. Este algoritmo implementado es el llamado *fast recovery* que permite recuperarse más rápidamente de la congestión y los errores en la red.

TCP – Reno también implementa *Header prediction* para optimizar el costo computacional del receptor y *delayed acknowledgments* que envía un ACK de un grupo de segmentos recibidos, en lugar de hacerlos uno a uno. Un problema de este protocolo se produce cuando existen varias pérdidas ya que solamente es posible recuperarse rápidamente de la primera pérdida.

Cuando Reno recibe tres ACK's duplicados, reduce a la mitad la ventana de congestión, ejecuta *fast retransmit*, y pasa a *fast recovery*. Si expira el temporizador se entra en fase de *slow start* al igual que Tahoe.

- **TCP – New Reno:** Hace una mejora a TCP Reno siendo capaz de detectar múltiples pérdidas de paquetes y por lo tanto es más eficiente que Reno en dicho caso. Implica mejoras en pérdidas de segmentos aislados, pero no tiene ventajas en caso de pérdidas en sucesivos segmentos. Estas pérdidas son comunes en enlaces de alta velocidad, donde la pérdida en general contiene varios segmentos.

Al igual que Reno, New-Reno también entra en *fast retransmit* cuando recibe varios paquetes duplicados, sin embargo, difiere de TCP-Reno, ya que no sale de la etapa de *fast recovery* hasta que todos los ACK's pendientes en el momento de la entrada a *fast recovery* lleguen. Por lo tanto, supera el problema que enfrenta TCP Reno de reducir los CWND múltiples veces. La fase *fast retransmit* es igual que en Reno, la diferencia está en la fase de *fast recovery* que permite retransmisiones múltiples en New-Reno.

Uno de los problemas de New – Reno es que toma un RTT para detectar cada paquete perdido. Cuando el ACK para el primer segmento retransmitido se recibe sólo, entonces se puede deducir que se perdió otro segmento.

- **TCP – SACK:** Brinda un mecanismo para obtener más información útil para el transmisor, ya que informa de los segmentos recibidos correctamente y así el transmisor puede conocer cuales segmentos se han perdido. SACK es un campo opcional en el encabezado TCP, que es enviado cuando se reciben datos fuera de secuencia. Es una extensión de TCP – Reno y TCP – New Reno, que trata de

mejorar los problemas relacionados con la detección múltiple de paquetes perdidos y la retransmisión de más de un paquete perdido por RTT.

TCP SACK mejora el manejo de segmentos perdidos en una misma ventana, en una forma más eficiente que TCP – New Reno, permitiendo su retransmisión en un solo *RTT*. En el caso de TCP New Reno, el protocolo se enterará de los segmentos perdidos a medida que reciba los que le preceden. El principal problema consiste en que actualmente los ACK's selectivos no son implementados por el receptor.

- **TCP – VEGAS:** Utiliza tres técnicas para mejorar el rendimiento de la red, el *throughput*, y las pérdidas de paquetes, haciéndolo diferente a las versiones anteriores de TCP. Primero mejora el algoritmo para calcular el RTT de cada paquete. La segunda técnica diferencia el TCP – Vegas respecto a TCP – Reno en el manejo de la congestión: mientras Vegas es proactivo (actúa contra la congestión antes de que sea detectada por la expiración del temporizador), Reno es reactivo (espera la pérdida de segmentos a los efectos de determinar el ancho de banda disponible en la red). TCP Vegas introduce un algoritmo para la predicción de la cantidad de datos que el enlace puede cursar sin congestión, e inyecta en el enlace dicha cantidad. Esta predicción se basa en medidas de *throughput*. Finalmente la tercera técnica busca evitar la congestión en el momento del *slow start* tratando de encontrar el ancho de banda disponible. (Brakmo & Peterson) (Fernández Hernández & Tavares Calafate, 2012)

2.5 TCP en Medios Inalámbricos

El protocolo TCP fue creado para ambientes de red basados en medios guiados en los cuales la tasa de error de bit (BER) es nula o despreciable y por ello se presume que en las pérdidas de paquetes en su mayoría se deben a la congestión en el medio (Redes de computadoras, 2003).

El protocolo TCP es sensible a las pérdidas y requiere la modificación del algoritmo de control que permita la adaptación a entornos inalámbricos. En dichos entornos TCP debería ser capaz de distinguir pérdidas por un enlace inalámbrico de las pérdidas debido a la congestión para utilizar la red de una manera eficiente. En la práctica gran parte de las implementaciones de TCP han sido optimizadas con base en supuestos que ocurren y se cumplen en las redes cableadas, mas no en las redes inalámbricas. Los enlaces inalámbricos son propensos a generar errores, desconexiones temporales y pérdidas de segmentos.

La falta de un mecanismo en TCP para distinguir pérdidas ocasionales de pérdidas por congestión en medios no guiados resulta en reducciones de la tasa de transmisión y una baja en el rendimiento (Pilo-País, 2011). El protocolo TCP debe ser modificado para que su rendimiento sea optimizado cuando se ejecuta sobre medios inalámbricos.

La modificación al protocolo TCP propuesta en (Olmedo, 2008) se basa en la modificación de la ventana de congestión cuando los segmentos TCP con errores causados por el canal inalámbrico se reconocen por una confirmación negativa

(NACK) o cuando la memoria intermedia del sistema está llena, el protocolo debe ser capaz de estimar el ancho de banda disponible.

En el receptor el protocolo TCP modificado descarta los segmentos que llegan con error, envía una notificación de error a la fuente, enviando únicamente una confirmación ACK a los segmentos que llegaron satisfactoriamente. Las simulaciones realizadas en (Pilo-País, 2011), demostraron incremento en la tasa de transmisión evitando la reducción de la ventana cuando expira un temporizador, además que los resultados obtenidos demuestran un mejor desempeño de TCP sobre ambientes inalámbricos en comparación con la versión convencional de TCP.

En pruebas realizadas por el Grupo de Investigación de Redes Inalámbricas (WiCOM), evaluaron el desempeño del protocolo TCP modificado en (Olmedo, 2008), obteniendo un mejor rendimiento con respecto al protocolo TCP normal en cortas distancias. Las pruebas han sido realizadas bajo diferentes distancias y en escenarios con y sin interferencia. Los resultados han demostrado que el protocolo TCP modificado con una ventana de contención de 15 tiende a mejorar el desempeño en ambientes inalámbricos a cortas distancias de manera teórica y práctica; por esta razón, se ha visto la necesidad de evaluar el desempeño del protocolo TCP en ambientes inalámbricos de larga distancia.

El siguiente proyecto investigativo se ha desarrollado con el nuevo algoritmo TCP en redes inalámbricas, cuyos resultados permitirán cuantificar el desempeño en la transmisión de datos y la optimización del protocolo.

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

Este capítulo detalla los materiales y métodos necesarios para el proceso de diseño y simulación del radio enlace entre islas en la Región Insular. En cuanto a los materiales, se hace una revisión de los elementos necesarios para desplegar un enlace a larga distancia utilizando WiLD, WiMAX y con equipos propietarios. En la sección de métodos, se enfoca principalmente en el estudio del software tanto de simulación que contribuye al diseño del radioenlace, como de inyección de tráfico que sirve para determinar el desempeño de la red. Finalmente, se hace una revisión de las máquinas virtuales implementadas en (Pilo-País, 2011), según las modificaciones al protocolo TCP propuestas en (Olmedo, 2008).

3.1. Materiales

Los materiales a utilizarse se eligen en función del estándar a utilizar en el radioenlace, además de otros parámetros importantes como son distancia del enlace, el tipo de antena, la altura en la torre, potencia de transmisión, la sensibilidad de recepción, temperatura, humedad existente en el lugar donde será implementada la red realizando un previo estudio de campo. Se estudian los equipos para realizar una conexión WiLD, WiMAX y equipos propietarios Motorola.

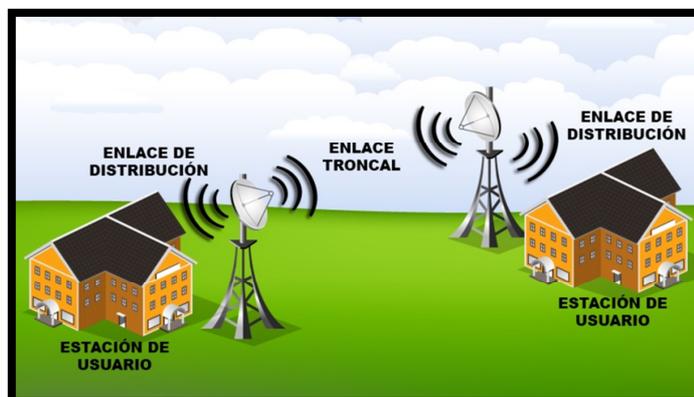


Figura 13. Escenario de configuración de los equipos

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

3.1.1 Equipos WiLD

- **Tarjeta Alix**

Las placas Alix son tarjetas embebidas que forman parte de un software basados en un procesador AMD GeodeLX700. Es una mini computadora que por su diseño pequeño y gran potencia tiene una gran facilidad para trabajar con las distintas aplicaciones de redes conocidas de alto nivel ya que se puede realizar modificaciones de algunos parámetros a nivel de la capa de enlace para así utilizar la tecnología WiFi de largo alcance. Una tarjeta *AlixBoard* consume alrededor de 5W y 12V DC. Las Tarjetas *Alix* permiten trabajar con dos tipos de chipsets (*Intersil Prism 2.5* y *Atheros*), con modelos que transmiten desde 80mW hasta 600mW. (Perez, 2011)

Tabla 6. Características de las Tarjetas Alix

CPU	433(LX700) o 500 MHz (LX800) AMD Geode LX CPU- cache = 64kb datos + 128kb L2- integrado acelerador crypto
DRAM	128 o 256 Mb DDR SDRAM (333 o 400 MHz de reloj.)
Disco de almacenamiento	Tarjeta compact flash
Alimentación	Requiere corriente continua, dependiendo de la tarjeta
Expansión	Bus LPC para añadir puertos seriales, dispositivos de entrada y salida generales. Bus ISA para dispositivos de entrada y salida con estándar de arquitectura industrial Bus I2C para interface de usuario que facilita la comunicación entre micro controlador, memorias y otros dispositivos.
Conectividad	De 1 a 3 puertos de Ethernet- vía VT6105M De 1 a 2 puertos miniPCI Puerto serial DB9

(Fuente: Elaborado por (Cano & Almeida, 2012))

Elementos de la Tarjeta Alix

1. Procesador AMD *Geode LX*
2. *Flash Award Bios* que es el sistema básico de entrada salida.
3. Puertos *Ethernet*
4. Puerto Serial DB9
5. Ranuras PCI para tarjetas inalámbricas.
6. Ranura tarjeta *Compact Flash*.
7. Puerto USB 2.0

8. JACK DC

9. Leds indicadores

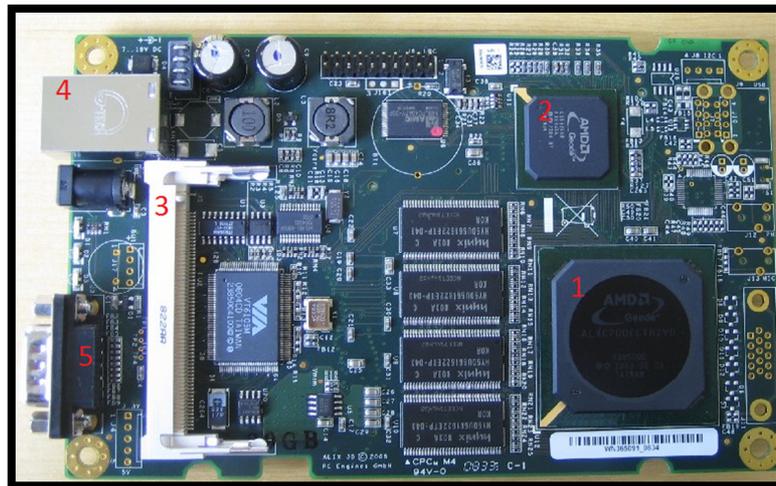


Figura 14. Parte superior Tarjeta Alix

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

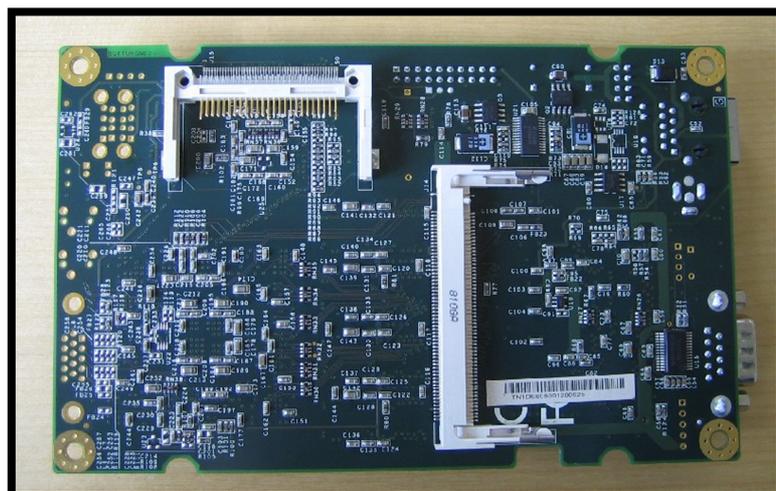


Figura 15. Parte inferior de la Tarjeta Alix

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

- **Antena Parabólica 24 dBi**



Figura 16. Antena parabólica

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

La antena parabólica ofrece 24 dBi de ganancia con un grado 8 de haz ancho para aplicaciones de largo alcance altamente direccional. Las aplicaciones incluyen sistemas de punto a punto, punto a multi-punto de puentes e inalámbricas en la banda ISM de 2.4GHz, así como IEEE 802.11b, sistemas inalámbricos 802.11g y 802.11n LAN.

- **Sistema Operativo LINUX VOYAGE**

Este sistema operativo está basado en Debian, versión optimizada para plataformas embebidas x86 como PCEnginesALix/ Wrap y Soekris. La instalación únicamente requiere de 128 Mb de espacio en el disco, con lo cual maneja el servidor de seguridad, puntos de acceso inalámbricos, puertas de enlace VoIP y dispositivos de almacenamiento de red (Linux Voyage)

3.1.2 Equipos WiMAX

Los equipos WiMAX existentes en los laboratorios de electrónica son del fabricante *Albentia Systems*, el sistema de comunicaciones está compuesta por una estación base y una repetidora, ambas configurables mediante su interfaz http.

- **Estación base ALB-256**

La estación base compatible con el estándar IEEE802.16-2009 diseñado para bandas no licenciadas, funciona en la banda de 5725-5875 MHz y posee un conector tipo N para una antena externa. Pertenece a la serie de los ALB-250 que tiene una capacidad neta máxima de 34.4Mbps. Este equipo es utilizado en enlaces PtP, posee una MAC basada en tramas libre de contienda (*contention free*) y una plataforma hardware robusta. Incorpora una capa-2 avanzada que permite priorizar y asignar el recurso físico para la diferenciación múltiple de flujos de servicio lo que se traduce en Calidad de Servicio-QoS.

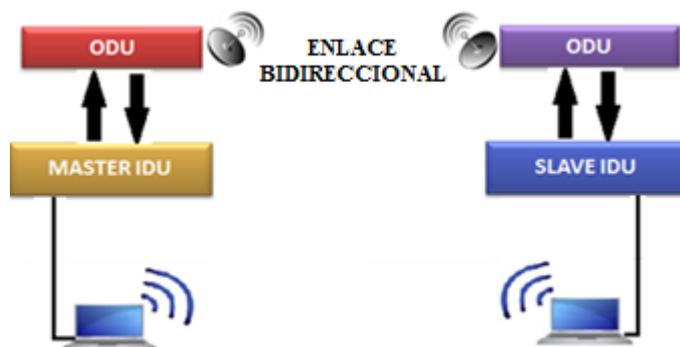


Figura 17. Descripción del sistema

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

Cada estación base (BS) está conformada por una unidad *indoor* (IDU) y una unidad de exterior uni o bidireccional a prueba de agua (ODU), la IDU ofrece el puerto Ethernet. La conexión entre la IDU y ODU es a través de un cable CAT-5 que provee potencia a las dos conexiones. Cada estación suscriptora se registra y establece un enlace de datos bidireccional con la BS. La BS funciona como una central hub o concentrador conectado a un punto de acceso de una red WAN, gestionando los enlaces inalámbricos para los suscriptores remotos. La Figura 18 muestra la IDU y ODU de la estación base:

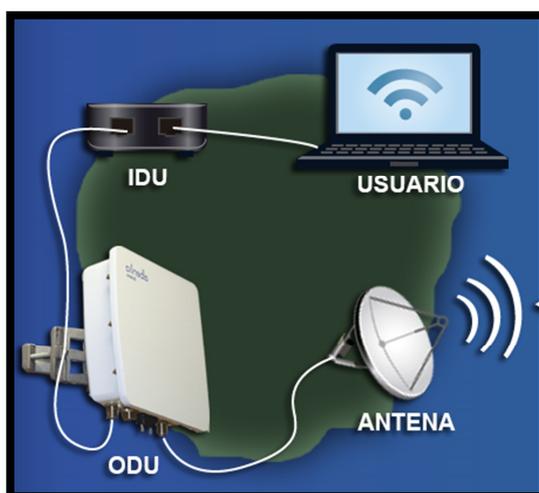


Figura 18. IDU ALB-256 Y ODU

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

Parámetros Importantes

- ✓ Cumplimiento del estándar IEEE802.16-2009 (WiMAX)
- ✓ Modulación adaptativa OFDM para un mejor rendimiento en escenarios NLOS

- ✓ Aplicaciones Punto a Punto
- ✓ Mecanismos avanzando de capa 2
- ✓ Control de calidad de servicio
- ✓ Banda de 5 GHz no licenciada
- ✓ Hasta 104 Mbps
- ✓ Transmisión Automática Energía (ATPC) permite un despliegue óptima de la red, ajustando la reutilización de frecuencias, y evitar interferencias
- ✓ La facilidad de integración de sistemas y prestación de Servicios remotos
- ✓ Ancho de banda de hasta 10 MHz
- ✓ Utiliza técnicas de modulación como BPSK, QPSK, 16-QAM y 64-QAM

Los equipos ALB256 se presentan en dos modalidades: con antena integrada de 23 dBi, o con conector N para antena externa (Systems, ALB-250 Series - 5 GHz band Datasheet, 2012).

- **Estación repetidora ARBA-550**

El repetidor interoperable WiMAX ARBA-550 opera en modo TDD, y está disponible para operar en las bandas libres de 5470-5725 MHz (ETSI) y 5725-5875 MHz (FCC) de Albentia Systems. Estos repetidores son compatibles con Estaciones Base y CPEs de cualquier fabricante que sean interoperable con en el estándar IEEE 802.16-2009. Es un equipo de red capaz de amplificar y retransmitir las señales WiMAX, El repetidor no tiene control sobre las señales que está retransmitiendo: se limita simplemente a amplificar y a convertir en frecuencia las señales que le entran por los puertos; por este motivo el equipo es del tipo AF (*Amplify and Forward*).

Parámetros Importantes

- Configuración unisectorial y multisectorial.
- El mejor en su clase, con una eficiencia espectral neta de 3.5bps/Hz.
- Total soporte de QoS: BE, RTPS, nRTPS y UGS.
- ARQ (Automatic Repeat Request).
- Disponible en las bandas ETSI 5470-5725 MHz y FCC 5725-5825 MHz.
- Avanzada configuración del Networking: bridging, routing, VLAN, NAT.
- Gestión SNMP, web, CLI y XML-RPC.
- Bajo consumo.
- Solución ideal para proporcionar cobertura WiMAX en zonas rurales con poca densidad de población y para incrementar el balance global del enlace a fin de poder ofrecer cobertura en interiores y en escenarios sin línea de vista.
- Cada unidad suministra hasta 120 dB de ganancia por cada vía de transmisión.
- Proporcionan una amplificación bidireccional sin degradación apreciable en la modulación EVM.
- Posee un *throughput* comparable con el de una banda licenciada gracias a usar un ancho de canal de hasta 10MHz.
- Facilidad de instalación además de su bajo consumo de potencia, condiciones ideales para su implementación en áreas rurales. (Avalos, 2010)
- El sistema completo está integrado en un diseño compacto y apto para intemperie, con dos conectores de tipo N para poder instalar las antenas de

Transporte y de Acceso. (Systems, ARBA-RPT-50: Repetidor WiMAX, 2012).

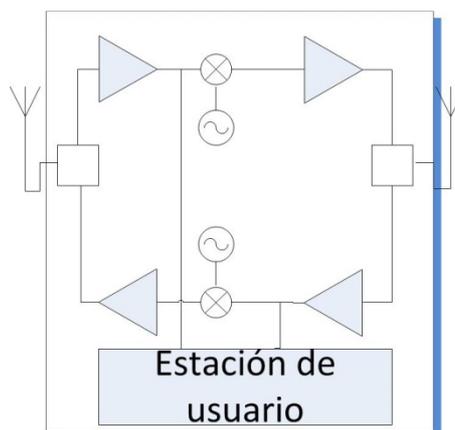


Figura 19. Diagrama de bloques del equipo RPT-500

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

Tabla 7. Parámetros de configuración de la CPE

Parámetros de radio	Descripción
Banda de frecuencia	5150 hasta 5950 MHz
Modo Dúplex	TDD, WiMAX/256 portadoras
Método de Acceso	TDMA
Modulación	OFDM, 256 subportadoras, prefijo cíclico 1/4, 1/8, 1/16, 1/32
Ancho de banda del canal	3,5,7,10 MHz
Modulación adaptativa	BPSK, QPSK, 16 QAM y 64 QAM
Velocidad de Código FEC	1/2, Y 3/4 , concatenando con Reed Solomon y Viterbi
Potencia de Salida Máxima	+20dBm

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)



**Figura 20. ETSI EN 300 019-1-3
C3.2 (IDU)**



**Figura 21. ETSI EN 300 019-1-4
C4.1E (ODU)**

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

- **Componentes adicionales**

Para realizar cualquier enlace de comunicaciones se requiere una serie de accesorios, además de los equipos de cada tecnología como son:

Tabla 8. Componentes adicionales

Nombre	Descripción
Antena sectorial	60 banda de 5GHz
Antena parabólica	
Protector de descargas	Rearmable para RF y herrajes
Cables	RF de 80cm

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

3.1.3 Equipos de radiofrecuencia propietarios

- **Motorola PTP 58600**

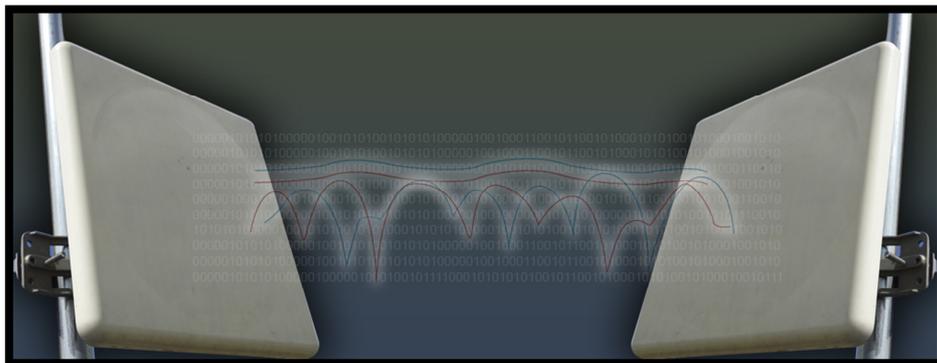


Figura 22. Motorola PTP 58600

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

Los enlaces Ethernet inalámbricos Punto a Punto PTP 54600 y PTP 58600 de Motorola combinan la velocidad y confiabilidad de la tecnología inalámbrica licenciada con la flexibilidad del espacio no licenciado, con espectro eficiente a nivel de operador que brindan tecnología MIMO, iOFDM, diversidad espacial y selección de frecuencia dinámica inteligente. Los puentes de la serie PTP 600 están incorporados en el portafolio MOTOWi4 de Motorola la cual brinda soluciones innovadoras de banda ancha inalámbrica que permiten crear, complementar y estructurar redes IP (Ortega Andrade, 2009). Estos equipos permiten:

- Entrada múltiple, salida múltiple (MIMO).
- Diversidad de frecuencia (iOFDM) y diversidad de espacio.
- Control de espectro avanzado con selección de frecuencia dinámica inteligente.
- Modulación adaptada.

Diversidad de frecuencia

Consiste en modular dos señales RF de distintas portadoras con la misma información, y transmitir ambas señales de RF a un destino dado. En el destino se modulan las dos portadoras y la señal de mejor calidad es la seleccionada, en la recepción, el receptor minimiza los efectos del desvanecimiento utilizando en cada instante la frecuencia que va teniendo la mayor intensidad de señal. Es así que los equipos Motorola utilizados analizan continuamente la calidad de la señal y utilizan las dos frecuencias para proporcionar al enlace una señal de óptima calidad en un solo canal.

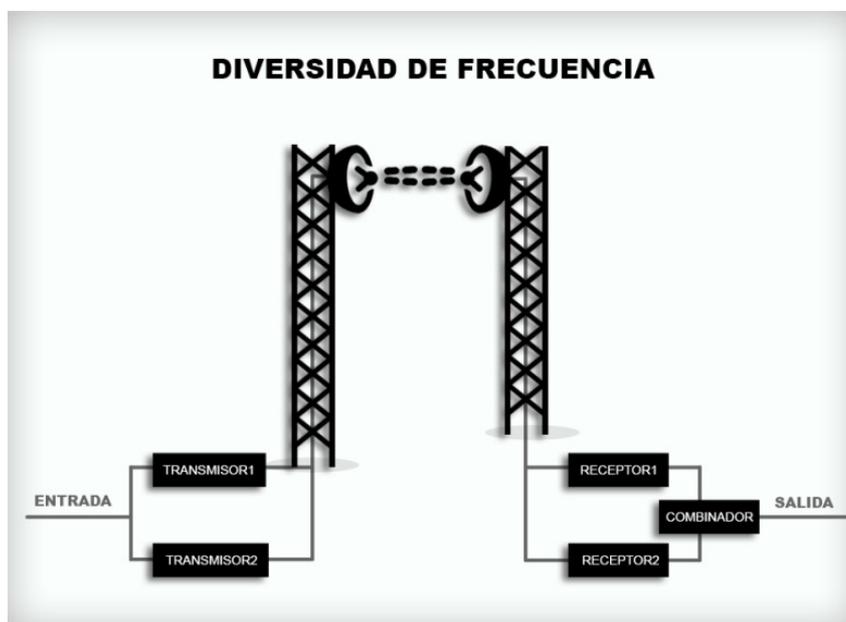


Figura 23. Diversidad de frecuencia

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

Diversidad de espacio

En la diversidad de espacio la información se envía en una misma frecuencia por dos trayectos diferentes, mediante una sola antena. La radio recepción se realiza mediante dos o más antenas físicamente separadas por una cantidad apreciable de longitud de onda. Los trayectos se eligen de tal manera que no exista desvanecimiento simultaneo, las señales captadas pasan a dos receptores que entregan una señal de salida combinada de intensidad casi constante a pesar del desvanecimiento que pueda ocurrir durante la propagación (Lenkurt Electric, 1978).

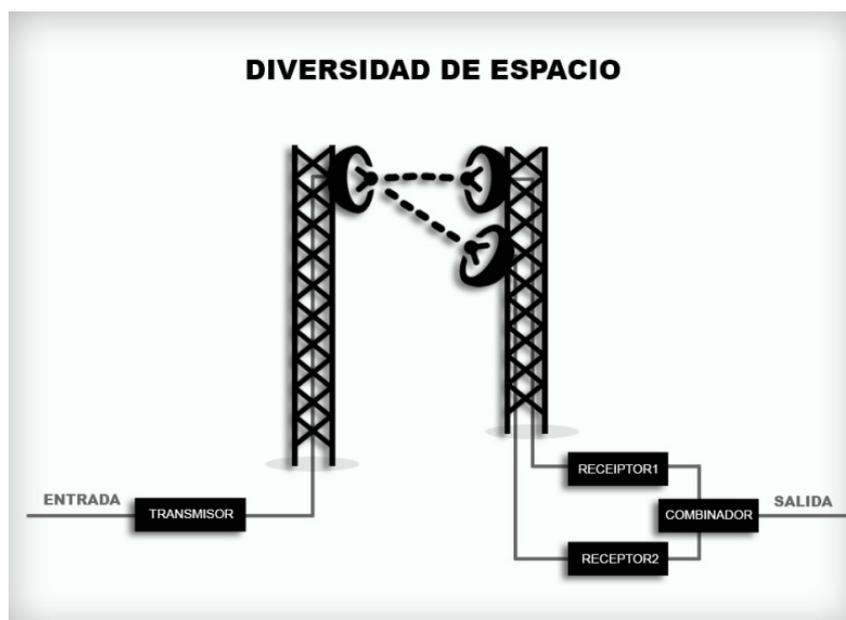


Figura 24. Diversidad de espacio

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

Tabla 9. Características importantes del Motorola PTP 58600

TECNOLOGÍA DE RADIO	OBSERVACIONES
Banda RF	5.470 GHz–5.725 GHz 5.725 GHz–5.850 GHz
Tamaño de canal	Configurable en 5, 10, 15 o 30 MHz
Selección de canal	Selección dinámica de frecuencia inteligente (<i>i</i> -DFS, por sus siglas en inglés) o intervención manual; selección automática durante el encendido y adaptación continua para evitar interferencias
Potencia de transmisión	Varía según modo de modulación y configuración en hasta 25 dBm
Ganancia del sistema	Integrado: Varía según modo de modulación; hasta 168 dB si se utiliza antena integrada de 23 dBi Conectorizado: Varía según modo de modulación y tipo de antena
Sensibilidad del receptor	Adaptativa, varía entre -98 dBm y -58 dBm
Modulación	Dinámica; se adapta entre BPSK simple y 256 QAM dual
Corrección de errores	FEC
Esquema dúplex	Duplexación por división de tiempo (TDD) y Duplexación por división en frecuencia Half-Duplex (HD-FDD), Relación fija o dinámica; cada enlace sincronizado por TDD requiere una unidad de sincronización. Memory link UltraSync™ GPS-100M para proveer una señal de referencia de temporización precisa
Antena:	Integrado: Placa plana integrada de 23 dBi/7° Conectorizado: Funciona con una serie de antenas de polarización dual o sencilla, adquiridas por separado mediante conectores 2 hembra tipo N (verifique las normas locales antes de la compra)
Alcance	Hasta 124 millas (200 km)
Seguridad y encriptación	Encriptación AES opcional de 128/256 bits que cumple con FIPS-197

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

3.1.4 Entorno de trabajo

- **Herramienta de análisis de tráfico**

El análisis de tráfico puede realizarse mediante la adopción de diversas técnicas que provienen del procesamiento digital de señales, la teoría de la información, reconocimiento de patrones, análisis estadísticos, modelos etc. En la actualidad se pueden seleccionar dos tipos de procedimientos para determinar los parámetros de una red como son procedimientos activos (afectan el tráfico normal de la red inyectando paquetes propios) y procedimientos pasivos (sólo capturan el tráfico a través de una interfaz).

En el presente proyecto de grado se ha decidido optar por el procedimiento activo, ya que mediante dicho procedimiento se puede analizar los parámetros de calidad necesarios para determinar el desempeño del protocolo TCP en ambientes inalámbricos a largas distancias. Para desarrollar dicho procedimiento es necesario la elección de la herramienta de inyección de tráfico apropiada para obtener los parámetros de calidad de servicio que se desea evaluar. Para la elección de la herramienta de inyección de tráfico se ha remitido a la tabla 10 en la cual se hace una comparativa de algunas herramientas disponibles para la evaluación del desempeño de redes de computadores (Velásquez & Gamess, 2009).

Tabla 10. Características evaluadas para seleccionar la herramienta de inyección de tráfico

PARÁMETRO	Netperf	D-ITG	NetStress	LANforge	WlanTV
Gratis	Sí	Sí	Sí	No	Sí
Código Abierto	Sí	Sí	No	No	Sí
Plataforma soportada	Linux	Linux, Windows	Windows	Linux, Windows	Linux, Windows
Protocolo de Red	IPv4, IPv6	IPv4, IPv6, ICMPv4, ICMPv6	IPv4, IPv6	IPv4, IPv6, ICMPv4, ICMPv6	IPv4, IPv6
Protocolo de Transporte	TCP, UDP	TCP, UDP	TCP	TCP, UDP	TCP, UDP
Resultados medidos	<i>Throughput</i>	Retardo, <i>jitter</i> , <i>throughput</i> , paquetes perdidos	<i>Throughput</i>	Retardo, <i>jitter</i> , <i>throughput</i>	<i>Throughput</i>
Interfaz de usuario	Consola	Consola - GUI	GUI	GUI	GUI

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

En conformidad con las características descritas en la tabla 10, se optó por seleccionar el D-ITG (*Distributed Internet Traffic Generator*). Esta es una herramienta de inyección de tráfico que tiene una plataforma de código abierto, sigue el modelo cliente- servidor, la cual permite generar tráfico y analizar protocolos a nivel de capa de aplicación, red y transporte. El tráfico generado pueden ser flujos simultáneos, como también simular comunicaciones bidireccionales. Está concebida

para ser usada como una herramienta distribuida de medición de rendimiento, capaz de calcular el retardo de ida (*OWD One Way Delay*) y de ida-y-vuelta (*RTT - Round Trip Time*), la tasa de pérdida de paquetes, el *jitter* y el *throughput*. (Botta, Dainotti, & Pescap, 2011).

Tabla 11. Componentes básicos de la plataforma D-ITG

ELEMENTO	DESCRIPCIÓN
ITGSend	Actúa como cliente y genera varios flujos de datos de forma simultánea siguiendo las especificaciones del archivo de configuración.
ITGRecv	Actúa como el servidor y puede recibir varios flujos de datos de diferentes clientes de forma simultánea.
ITGLog	Es el servidor de almacenamiento (log) de la plataforma.
ITGDec	Analiza los resultados de los experimentos realizados.
ITGPlot	Es una herramienta basada en <i>Octave</i> para graficar los datos contenidos en los archivos log construidos con ITGDec.
ITGapi	Es un API de C++ que permite el control remoto de la generación de tráfico.

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

- **Herramienta de simulación de red SIRENET**

SIRENET: (*Simulation of Radio electric Networks*) es una herramienta de simulación que facilita la planificación y gestión de redes la cual permite trabajar con todo tipo de servicios radioeléctricos y tecnologías, siendo una aplicación idónea para el diseño de redes de radiodifusión, servicios móviles y servicio fijo, utilizando una cartografía digital, con algoritmos de cálculo avanzados (Manual SIRENET, 2007)

El estudio básico es la realización de un perfil radioeléctrico entre dos puntos, a partir de ahí se realizan estudios de mayor complejidad que involucran a una o varias

estaciones y que cubren todas las fases de un proceso de planificación de red, permitiendo estudiar la cobertura radioeléctrica de una red de estaciones, estimar la compatibilidad radioeléctrica de los elementos de la misma, proponer frecuencias de forma automática, etc.

Para realizar las simulaciones del radioenlace se optó por escoger esta poderosa herramienta de software propietario para realizar con mayor precisión el estudio de propagación ya que entre sus ventajas cuenta con la aplicación de modelos de predicción de propagación a ser utilizados. Esta herramienta requiere información topográfica del área dónde se va a realizar el estudio de propagación. El hecho de poder contar con topografía digital del Ecuador, nos permite tener un gran detalle de las zonas que se pretende servir con el sistema de comunicaciones. Los algoritmos de planificación deben ser pensados para cada zona en particular evaluando su climatología y orografía.

Otra de las ventajas es que SIRENET por ser un software propietario es óptimo para la realización de enlaces a larga distancia por su cartografía detallada de la Región Insular, editando algunos parámetros dependiendo las necesidades que se puedan obtener al realizar el radioenlace como antenas, emplazamientos, transmisores, receptores y servicios.

Modelos de propagación

Los modelos de propagación son un conjunto de expresiones matemáticas, diagramas y algoritmos usados para representar total o parcialmente las características del canal de radio en un ambiente dado. (V. Erceg, 1999) (Céspedes Sotomayor, 2008)

Estos modelos son importantes al realizar un análisis de cobertura especialmente si es un enlace de larga distancia, por esto se realiza un análisis de las características de cada modelo de propagación para determinar cuál es el indicado para trabajar en el enlace inter-islas de 92 [km] utilizando la tecnología 802.11n en una banda de 20 MHz. Entre los modelos más importantes tenemos:

- **UIT 526.10**

Es un modelo determinístico con un análisis geométrico del perfil radioeléctrico, define pérdidas por espacio libre y pérdidas por difracción de la señal en los diferentes obstáculos existentes entre el transmisor y el receptor.

Es indicado en aplicaciones con entornos donde dominan obstáculos determinísticos, como es el caso de enlaces de microondas punto a punto, punto a multipunto, accesos rurales o radiodifusión rural. Sin embargo, pierde fiabilidad en distancias superiores a 70 km donde comienza a ser aconsejable el empleo de métodos de dispersión troposférica.

- **SUI (Editable ampliado)**

Es un modelo diseñado para canales WiMAX desarrollado por el grupo 802.16 del IEEE, conjuntamente con la Universidad de Stanford, para entornos suburbanos. El modelo SUI clasifica el terreno en tres tipos:

✓ **Tipo A:** Experimenta las mayores pérdidas por propagación, y corresponde a terrenos montañosos con una densidad boscosa moderada o alta.

✓ **Tipo B:** Corresponde con el término medio y comprende tanto los terrenos montañosos con una densidad boscosa baja como los terrenos planos con densidad boscosa elevada o moderada.

✓ **Tipo C:** Experimenta las menores pérdidas por propagación y corresponde a zonas planas con reducida densidad de árboles.

A continuación se describe el modelo SUI y algunas variaciones del mismo que añaden factores de corrección.

a) Modelo SUI básico (o modelo Erceg)

El modelo SUI básico propuesto por el IEEE, está basado en el modelo de Erceg para frecuencias cercanas a 2 GHz, altura de antena receptora menor a 2 m, y debe aplicarse a entornos suburbanos. (V. Erceg, 1999)

En el mismo se define la siguiente expresión para la pérdida básica de propagación:

$$L_b(dB) = A + 10\gamma \log\left(\frac{d}{d_o}\right) + s \quad (3. 1)$$

Donde las condiciones iniciales son:

✓ $d > 10$

✓ $d_o = 1000 [m]$

✓ $10 m < h_b < 80 m$

$$\checkmark 8.2 \text{ dB} < s < 10.6 \text{ dB}$$

$$A = 20 \log \left(\frac{4 \pi d_o}{\lambda} \right) \quad (3.2)$$

$$\gamma = a - bh_b + \frac{c}{h_b} \quad (3.3)$$

Siendo:

- ✓ d : distancia entre base y receptor, en metros
- ✓ λ : longitud de onda, en metros ; $f \leq 2000$ MHz
- ✓ γ : exponente de pérdidas
- ✓ h_b : altura de la estación base, en metros.
- ✓ s : efecto de desvanecimiento.
- ✓ a, b, c : constantes que dependen de la categoría del terreno

Tabla 12. Parámetros del modelo SUI

	Categoría A	Categoría B	Categoría C
A	4.6	4	3.6
B	0.0075	0.0065	0.005
C	12.6	17.1	20

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

a) Modelo SUI con factor de corrección de frecuencia

Para frecuencias mayores a 2 GHz y altura de antena receptora, h , entre 2 y 10 m, se introducen factores de corrección al modelo básico, previamente estudiado.

$$L_b(\text{dB}) = A + 10\gamma \log \left(\frac{d}{d_o} \right) + s + \Delta L_{bf} + \Delta L_{bh} \quad (3.4)$$

ΔL_{bf} : es el factor de corrección para la frecuencia

Dónde:

$$\Delta L_{bf} = 6 \log \left(\frac{f}{2000} \right) \quad (3.5)$$

ΔL_{bh} es el factor de corrección para la altura de antena del receptor, h :

$$\Delta L_{bh} = \left\{ \begin{array}{l} -10.8 \log \left(\frac{h}{2} \right) \text{ para terrenos tipo A y B} \\ -20 \log \left(\frac{h}{2} \right) \text{ para terrenos tipo C} \end{array} \right\} \quad (3.6)$$

Esta versión del modelo SUI, que incluye factores de corrección, es la que es mayormente empleada en cálculos de propagación con este modelo.

Aplicaciones

- ✓ Este modelo es muy flexible, porque puede modificarse de acuerdo a resultados de medidas.
- ✓ Suele emplearse para simular unas condiciones de línea de vista con valores de pérdidas superiores a los de espacio libre.

- **Herramienta de simulación PTP LINKPlanner de Motorola**

Esta herramienta fue utilizada para la simulación del enlace inalámbrico con la utilización de los equipos Motorola. Este programa busca eliminar la mayor cantidad

de suposiciones en el proceso de diseño del enlace y brinda la información necesaria para determinar un rendimiento del enlace más cercano a la realidad. Existen versiones compatibles para los sistemas operativos de Mac y Windows. Otra de las ventajas es que esta herramienta de diseño de sistemas es gratuita y de fácil utilización. Este simulador es combinable con otros programas como por ejemplo MeshPlanner y LANPlanner, con las cuales se puede diseñar prácticamente cualquier tipo de redes inalámbricas (tamaño y complejidad) de forma sencilla, óptima y real.

PTP LINKPlanner está diseñado para realizar enlaces Ethernet inalámbricos punto a punto con equipos Motorola. Entre sus funciones están las de construir un enlace inalámbrico con una confiabilidad de cinco cifras decimales de precisión, se puede utilizar Google Earth para tener una perspectiva de la red inalámbrica además de variar los escenarios para optimizar el rendimiento según la geografía propia del sistema, distancias, altura y potencias de transmisión.

Para la utilización de este programa es necesario ingresar la información de los sitios donde se planea realizar el enlace. Los valores de las coordenadas geográficas se los puede ingresar desde Google Earth, Multimap o un GPS. Con dicha información se generan automáticamente los perfiles del trayecto desde una base de datos creada por la Misión Topográfica Radar Shuttle (SRTM)

Se puede modificar algunas características del sistema, como por ejemplo el tipo y la altura de la antena, para alcanzar los requerimientos de rendimiento y disponibilidad deseados. Se puede observar también el margen de ganancia proyectado del sistema y la pérdida de trayecto del enlace.

- **Máquinas Virtuales**

Modificaciones de la ventana deslizante de TCP en el kernel de Linux

Las comunicaciones inalámbricas tienen algunos inconvenientes como generar errores, desconexiones o pérdida de segmentos, ya que no existe un mecanismo en donde pueda reconocer entre problemas por congestión y errores debido al medio ya que los mecanismos existentes están pensados en prevenir la congestión o evitarla.

La congestión se controla mediante una herramienta de confirmación que avisa que un segmento ha llegado sin error (ACK), mientras que en caso de descartar un segmento con error, este no será informado al transmisor, y el transmisor lo asume que la causa de la pérdida de este segmento fue por congestión y empieza a disminuir su ventana de congestión, debido a esta disminución de ventana, empieza a enviar menos segmentos y esto resulta en reducciones de la tasa de transmisión y una baja en el rendimiento.

Para mejorar el desempeño de TCP sobre redes inalámbricas se propone en (Olmedo, 2008) la creación de una bandera NACK o acuse de recibo negativo. La función de esta bandera es informar al transmisor la llegada de segmentos TCP con error para su retransmisión, evitando disminuir la ventana de congestión, es decir que no afectará el *throughput*.

Los NACKs se manejan de manera similar a los ACK's, tienen un campo de información de NACK y un número de NACK, utilizarán uno de los bits reservados de la cabecera TCP para indicar que el segmento contiene datos de este tipo y el número se enviará en la misma posición de secuencia del ACK. (Albuja, 2011),

cuando el transmisor reciba un NACK en primer lugar no se reducirá la ventana de congestión y retransmite el segmento con error excepto los casos en donde si exista congestión.

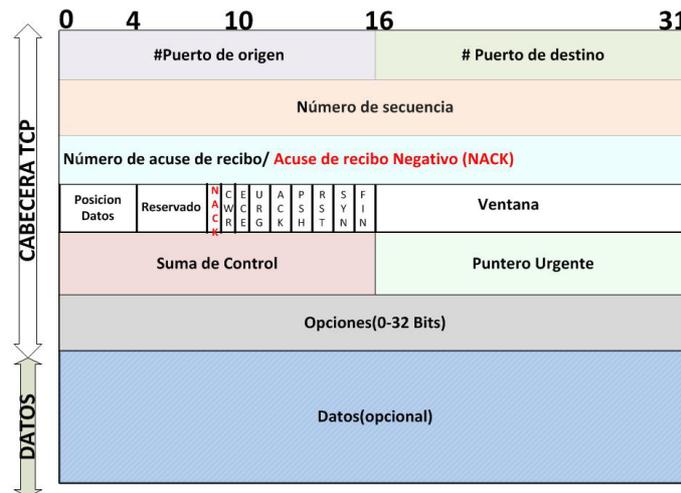


Figura 25. Formato encabezado TCP modificado

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

3.1.5 Ventana de congestión de TCP con NACK

En la Figura 26 se muestra el comportamiento esperado de la ventana de congestión con NACKs (Olmedo, 2008)

La Figura 27 muestra el comportamiento de la ventana de congestión para TCP *Reno* convencional y aquí se puede observar la disminución de la ventana de congestión por los errores existentes durante la transmisión, y esto implica una reducción significativa en el rendimiento (Olmedo, 2008).

En (Olmedo, 2008) se realiza una propuesta que sugiere utilizar el algoritmo TCP-Reno como base para la creación de TCP-NACK y la compatibilidad del nuevo protocolo con otras versiones. Así, si el nodo receptor y transmisor funcionan con TCP-NACK, cuando el transmisor reciba una confirmación negativa de un segmento, esperará un tiempo igual al T_{RTT} después del NACK para recibir la confirmación de que el segmento retransmitido ha llegado con éxito.

Las modificaciones al algoritmo TCP propuestas en (Olmedo, 2008) fueron implementadas en el código fuente de Linux en (Pilo-País, 2011). El objetivo de este trabajo investigativo es poder evaluar experimentalmente dichas propuestas en un enlace de larga distancia inter-islas en la Región Insular con la finalidad de comparar el desempeño del protocolo TCP en entornos inalámbricos.

3.2 Métodos

La metodología utilizada en este proyecto consta de tres fases principales las cuales se basan en la investigación de los estándares IEEE 802.11, IEEE 802.16, del protocolo TCP; además de un estudio de los elementos de *hardware* y *software* mediante los cuales permiten diseñar y simular un enlace a larga distancia con las

diferentes tecnologías. Una vez realizado el estudio de los elementos y las simulaciones necesarias, se realizó un estudio de campo para determinar los mejores sitios para determinar los sitios donde se implementa la red. La segunda parte consta en la instalación de equipos y pruebas necesarias para determinar el desempeño del protocolo TCP en ambientes inalámbricos. Finalmente la tercera parte consta del análisis y de los resultados obtenidos.

3.2.1 Configuración de los equipos WiLD

Para la utilización de las tarjetas Alix, es necesaria su configuración como se detalla en (Barrionuevo Zapata & Tamayo Vegas , 2011). El procedimiento básico consiste en el formateo de la memoria de las tarjetas Alix, el formateo de la unidad Compact Flash, para proceder a instalar en esta unidad el *Sistema Voyage Linux*. Una vez instalado el sistema operativo se procede a la configuración de la tarjeta Alix. Una explicación más detallada de este procedimiento se encuentra en los Anexos.

3.2.2 Modificación en las Tarjetas Alix para largas distancias

Es importante que algunos parámetros de la tarjeta inalámbrica sean modificados para que el enlace ocurra a una distancia mayor a 10 kilómetros. El proceso de configuración culmina con el ajuste de los siguientes parámetros para trabajar a largas distancias: el *ACK time-out*, *CTS (Clear to Send)* y el intervalo de tiempo definido como *Slot time*.

Procedimiento:

1. Ingresar al sistema *Linux Voyage* mediante el comando **ssh** seguido de la dirección IP configurada en la tarjeta con la clave *Voyage*.
2. Buscar el dentro del proceso *proc file system* un fichero virtual llamado: *acktimeout*, *ctstimeout* y finalmente el *slot time* mediante el siguiente comando: **find /proc -name acktimeout (ctstimeout – slot time)**.
3. Modificar los parámetros de acuerdo a la distancia obtenida, mediante el comando **athctrl ath0 d92000**. En este caso, se configura la distancia del enlace que se va a utilizar. El driver de MadWiFi con solo ingresar la distancia del enlace, modifica los parámetros indicados. Dentro del sistema operativo Linux Voyage se ingresa la distancia en metros.
4. Verificar los valores obtenidos para el *ACK timeout*, *CTS-timeout*, y *slot time*. Mediante el comando “cat”, y accediendo al directorio de cada parámetro.

CAPÍTULO IV

PLANIFICACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE LA RED

4.1 Estudio de necesidades

El presente capítulo, tiene como objetivo diseñar una red usando equipos de radiofrecuencia para interconectar los nodos que se encuentran entre las islas San Cristóbal y Santa Cruz, parte del Archipiélago de Galápagos. Para la realización del diseño de la red, se ha considerado un conjunto de etapas, como son los criterios para diseñar la red en base a las necesidades de cada nodo, y la implementación, la cual permite constatar que se cumplan con las especificaciones establecidas en los requerimientos y pruebas. Cumpliendo con todos los requisitos se seleccionara el mejor sitio en cada isla para realizar el enlace de comunicación en base a una buena planificación.

4.1.1 Variables de estudio

La propuesta en este capítulo es el diseño de la red de telecomunicaciones Inter-Islands entre San Cristóbal y Santa Cruz, parte del Archipiélago de Galápagos, la cual se utilizaron los equipos de radiofrecuencia para interconectar los sitios que se seleccionaran en base a la planificación. Para realizar la evaluación de este enlace y evaluar la nueva solución del protocolo TCP en ambientes inalámbricos de larga distancia, se ha considerado una serie de etapas, que van desde la generación de un

conjunto de criterios para diseñar la red en base a las necesidades de la organización hasta su implementación.

La provincia de Galápagos por ser Parque Nacional y patrimonio natural de la humanidad está sujeta a leyes y reglamentos, es decir existen varios tipos de prohibiciones, una de estas es la colocación de torres para telecomunicaciones. Está terminantemente prohibido la colocación de antenas o cualquier tipo de construcción en áreas del parque, así como en áreas de visita, y es por esto que existen sitios específicos para la colocación de antenas y torres, las mismas que en su mayoría son compartidas. Estas torres están ubicadas ya en puntos estratégicos las cuales proporcionan mejores condiciones en un enlace.

Los lugares previamente seleccionados para la realización de este proyecto se los muestra en la siguiente tabla:

Tabla 13. Coordenadas de los puntos de interés

	LATITUD	LONGITUD	Torre
Isla Santa Cruz			
1) Cerro Crocker	00°38'36.34"S	090°19'55.46"W	20 [m]
2) Cerro La Vertiente	00°44'34.20"S	090°19'55.46"W	20 [m]
Isla San Cristóbal			
3) Cerro San Joaquín	00°53'51.93"S	089°31'03.30"W	20 [m]
4) Cerro Patricio	00°54'22.27"S	089°36'16.15"W	20 [m]

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)



Figura 28. Ubicación Geográfica de los puntos de interés

(Fuente: Elaborado por Google earth)

- **Cerro Crocker**

La Estación Científica Charles Darwin (ECCD) es una estación de investigación biológica operada por la Fundación Charles Darwin. Se encuentra ubicada en Puerto Ayora en la isla Santa Cruz, la estación principal del enlace se encuentra localizada en esta isla, la antena está ubicada en la parte más alta de la isla que es el Cerro Crocker como se puede ver en la Figura. 29, el cual se encuentra ubicado a 860 m de altura sobre el nivel del mar, debido a su posición central con respecto a las demás islas, facilita la propagación ya que existe línea de vista con varios puntos en la región, lo cual es importante en el radioenlace. En esta ubicación se cuenta con una

torre auto soportada de 30 m de altura que se la puede usar para la instalación de los equipos.



Figura 29. Fotografía Cerro Crocker

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)



Figura 30. Estación Científica Charles Darwin

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

- **Cerro La Vertiente**

El Consejo de Gobierno es el organismo responsable de la administración de la provincia, la planificación, el ordenamiento territorial, el manejo de los recursos y la organización de las actividades que se realizan en Galápagos, las estaciones están ubicadas en el cerro La Vertiente que cuenta con una altura de 100 m. sobre el nivel del mar, con la altura de la antena de 50 m.

- **Cerro San Joaquín (San Cristóbal)**

La Isla San Cristóbal se encuentra localizada en el extremo oriental del archipiélago, la altitud máxima en la isla es de 730 m sobre el nivel del mar que corresponde al cerro San Joaquín, su área aproximada es de 556.97km^2 , la cual facilita la propagación ya que existe línea de vista con los puntos de interés.



Figura 31. Fotografía Cerro San Joaquín

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

- **San Patricio**

El cerro Patricio tiene una altitud Geográfica de 61 metros sobre el nivel del mar. En este sitio se cuenta con una torre auto soportada de 30 m de altura. En este cerro, el Parque Nacional Galápagos tiene su base principal en San Cristóbal.



Figura 32. Parque Nacional Galápagos

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

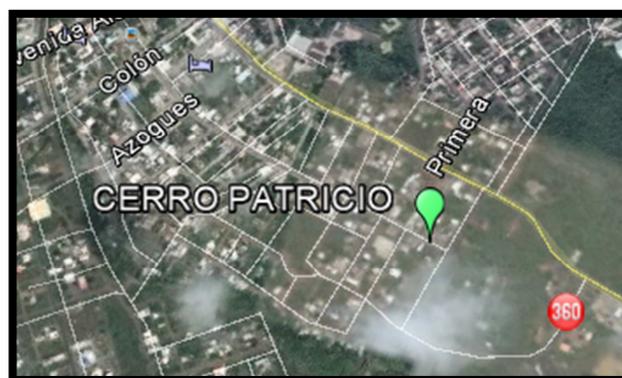


Figura 33. Satelital del Cerro Patricio

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

4.2 Estudio de campo

La planificación del enlace se determina mediante un estudio de campo del lugar, ya que es muy importante para el diseño e implementación de una red inalámbrica, para observar cuales son las necesidades del sitio y así comprobar que existen facilidades de acceso para poder llegar con los equipos, tanto al cerro ubicado en la isla San Cristóbal, como en la isla Santa Cruz. A pesar que las islas cuentan con torres, casetas de instalación eléctrica, el clima y el terreno son los mayores factores a considerar antes de instalar el sistema de comunicaciones, ya que el viento en estas zonas podría provocar problemas para la implementación.

Mediante este estudio de campo se puede determinar las características propias de cada posible nodo y escoger el que mayores beneficios aporte tanto en la parte física como en el desempeño de la red. Esta fase consiste en la visita a los posibles nodos de la red, incluyendo la planificación de visitas, la coordinación y la definición de recursos a emplear, como herramientas y el equipamiento.

El estudio de campo consiste en validar el pre-diseño o, por el contrario, determinar la necesidad de modificarlo. En el terreno se comprobará cuál es la locación óptima de los nodos a ser conectados para realizar el enlace entre la isla Santa Cruz y la isla San Cristóbal, corroborando con el análisis mediante el software de simulación SIRENET y PTP LINKPlanner de Motorola.

4.2.1 Elementos Indispensables

Para tener una buena comunicación entre los puntos antes de realizar el enlace se deben tener en cuenta algunos elementos importantes los cuales facilitaran la instalación así como un GPS con brújula para la toma exacta de coordenadas.

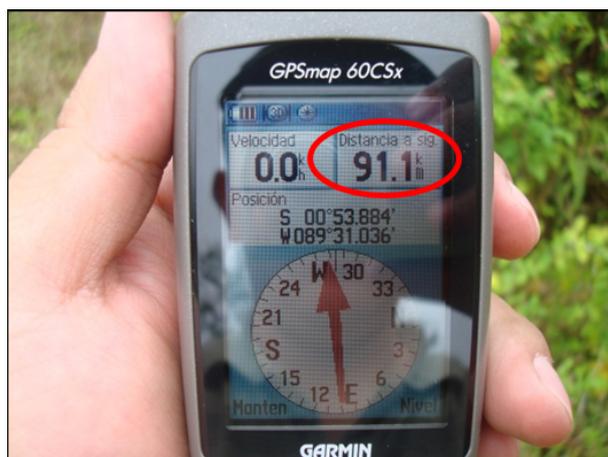


Figura 34. GPS - distancia entre las Islas

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

4.2.2 Herramientas necesarias:

- GPS con brújula
- Teléfonos celulares
- Laptop con software apropiado para la inyección de tráfico (D-ITG)
- Abrazaderas para sujetar la antena
- Arnés y correa de seguridad para sujetarse a la torre o mástil
- Equipamiento apropiado para la instalación de los equipos
- Cuerda 50 m
- Nivelador de burbuja

- Herramientas básicas
- Polea para subir la antena
- Radios WiFi que se van a utilizar en el enlace con sus cables, (pigtailes) y

antenas

4.3 Visita De Campo

La importancia de realizar la visita de campo es debido a que es preciso conocer donde se va a implementar el radioenlace, de conocer si existe factibilidad de llegar a la cima donde se encuentran las antenas con facilidad, así como también realizar un estudio del alcance del enlace, si existen obstrucciones o si hay línea de vista, verificar a qué condiciones climáticas nos vamos a enfrentar, arboles , edificios, y obstáculos que influyen en la recepción de la señal y todos los por menores que pueden provocar cualquier tipo de pérdidas.

En primer lugar se define los lugares a ser visitados, medir el tiempo y distancia entre desplazamientos, la visita de campo deberá recopilar toda la información necesaria para un correcto estudio tanto la altitud, las coordenadas geográficas con GPS, la accesibilidad al lugar para así poder hacer una correcta elección de los nodos en los cuales se va a realizar el emplazamiento de la red.

En esta visita técnica es importante realizar un estudio estructural de las torres que van a soportar las antenas para evitar riesgos.

Galápagos por sus leyes y ordenamientos, la otra parte importante en la visita será reunirse con las autoridades para poder quedar en acuerdos y obtener todos los

permisos necesarios para así poder solicitar tanto al Consejo d Gobierno de Galápagos como al Parque Nacional, autorizaciones para instalar los equipos y así explicar los alcances del proyecto y las necesidades que se determinaron en la visita a los sitios.

- **Visita En La Isla San Cristóbal**

Mediante la visita en la isla San Cristóbal se pudo verificar que si existe factibilidad de acceso al cerro San Joaquín, debido a que si existe carretera al sitio para poder acceder con las antenas y equipos necesarios hasta el lugar donde se encuentran las torres. Las torres auto-soportadas instaladas en el Cerro San Joaquín tienen una altura de 30 m. En el Cerro Patricio se encuentran las instalaciones del Parque Nacional Galápagos, sin embargo, en este lugar no se tuvo el espacio físico para la instalación de nuevos equipos.



Figura 35. Estación Cerro San Joaquín



Figura 36. Torre Cerro San Joaquín

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

- **Visita en La Isla Santa Cruz**

De igual manera en la visita a la isla Santa Cruz, se comprobó las facilidades físicas, técnicas y de acceso al cerro Crocker. Las instalaciones en la Vertiente son de más fácil acceso, sin embargo, en Crocker se tiene mayor espacio para la instalación. Otro punto a destacar, es la necesidad de retirar algunas antenas que están en desuso en el la torre del Cerro La Vertiente, para poder instalar los equipos para este enlace.

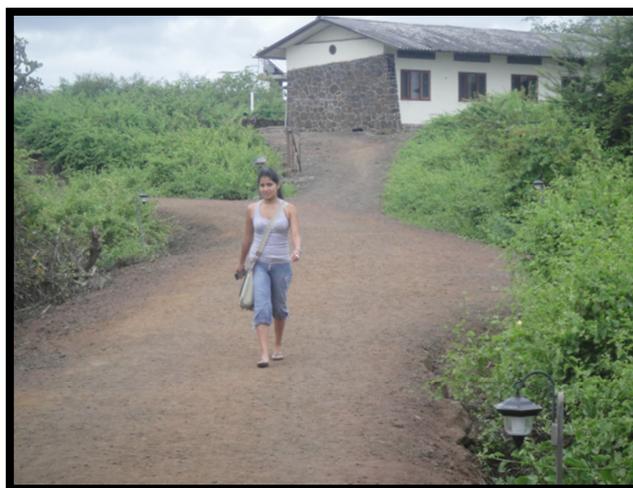


Figura 37. Visita Isla Santa Cruz

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

4.4 Descripción general de la red inalámbrica

En esta fase se definirán los tipos de enlaces y las tecnologías, así como la altitud y coordenadas de los nodos y las distancias de los enlaces. El diseño de la red está basado en el estudio de necesidades y del estudio de campo realizado previamente.

4.5 Planificación de la red

La Planificación de la red es un proceso el cual tiene como objetivo la localización de los emplazamientos de la red, así como su configuración para conocer cuál es la mejor tecnología que va a ser utilizada. En este proceso se debe garantizar que se cumpla con los criterios de capacidad, cobertura y calidad del servicio en el área de interés.

El estudio a realizarse en las herramientas SIRENET y PTP LINKPlanner será para conocer el perfil del terreno entre el transmisor y receptor, analizando la disminución de la señal y la línea de vista entre ambos emplazamientos, con esto se conocerá el nivel de señal recibido y la primera zona de Fresnel para saber si se encuentra libre. Este procedimiento también se lo realiza con la herramienta PTP LINKPlanner de Motorola, para poder comparar los resultados con los equipos propietarios.

La zona de Fresnel es el área el cual lo forman dos elipsoides concéntricos que rodean al rayo directo entre el emisor y receptor de una onda electromagnética, la obstrucción máxima a considerar en este enlace será del 60%, aunque también depende de factores como la curvatura de la tierra, en este estudio tendrá un factor $K= 2/3$.

Luego de realizada la visita de campo se procede a ver los puntos de interés y verificar si es que existe comunicación entre los nodos mediante los software de simulación de enlaces radioeléctricos SIRENET y PTP LINKPlanner. Para realizar el cálculo se definirán los enlaces:

4.5.1 La Vertiente - Cerro San Joaquín

El primer enlace son los puntos del Consejo de Gobierno de Galápagos, Cerro La Vertiente en Santa Cruz y el Cerro San Joaquín en San Cristóbal. Dichos puntos están ubicados a una distancia de 91.24 km. En la isla Santa Cruz, sede del Consejo de Gobierno, las estaciones están ubicadas en el cerro La Vertiente que cuenta con una altura de 100 m. sobre el nivel del mar, mientras que el cerro San Joaquín, ubicado en San Cristóbal tiene una altura es de 630m.

Los datos de las coordenadas de los puntos geográficos, el cálculo de la trayectoria, altura de las antenas y capacidad de enlaces se introdujeron en el software SIRENET y se evaluó el enlace con WiFi de 20 MHz., 40 MHz., y WiMAX fijo. Los parámetros introducidos en SIRENET tanto para el transmisor como para el receptor se reflejan en la siguiente tabla 14:

Tabla 14. Parámetros del transmisor

Tipo de servicio:	802.11n (20 MHz.)	802.11n (40 MHz.)	WiMAX Fijo
Frecuencia de referencia:	5500 MHz	5500 MHz	5750 MHz
Polarización del enlace:	Horizontal	Horizontal	Horizontal
Tipo de antena:	directiva 24 dBi	directiva 24 dBi	WiMAX directiva 32 dBi
Potencia:	30 dBm	30 dBm	30 dBm
Altura:	20 m	20 m	20 m
Velocidad:	2 Mbps	2 Mbps	2 Mbps
Modulación:	4-PSK	4-PSK	4-PSK

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

Tabla 15. Parámetros del receptor

Tipo de servicio:	802.11n (20 MHz.)	802.11n (40 MHz.)	WiMAX Fijo
Frecuencia de referencia:	5500 MHz	5500 MHz	5750 MHz
Polarización del enlace:	Horizontal	Horizontal	Horizontal
Tipo de antena:	directiva 24 dBi	directiva 24 dBi	WiMAX directiva 32 dBi
Potencia:	30 dBm	30 dBm	30 dBm
Altura:	20 m	20 m	
Sensibilidad del receptor:	-90 dBm	-79 dBm	-90dBm
Impedancia del receptor:	50 Ω	50 Ω	50 Ω
Perdidas de recepción:	0 dB	0 dB	0 dB

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

El procedimiento antes descrito también se lo realiza utilizando PTP LINKPlanner para determinar las mejores condiciones de la red a implementar.

- **Modelo de propagación**

Para calcular la interferencia por el tipo de entorno en el cual se realiza el enlace se usa el modelo de propagación de la Recomendación 526.10 de la UIT-R para 802.11n. Es necesario tener en cuenta en estos casos que los resultados de la simulación aseguran los niveles superados en el 50% de tiempo y ubicaciones, por lo que es necesario tener en cuenta el margen de desvanecimiento configurable en los parámetros del método de cálculo.



Figura 38. Perfil de cobertura con 802.11n de 20 MHz.

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación mediante SIRENET)

- **Resultados con 802.11n de 20 MHz en Sirenet.**

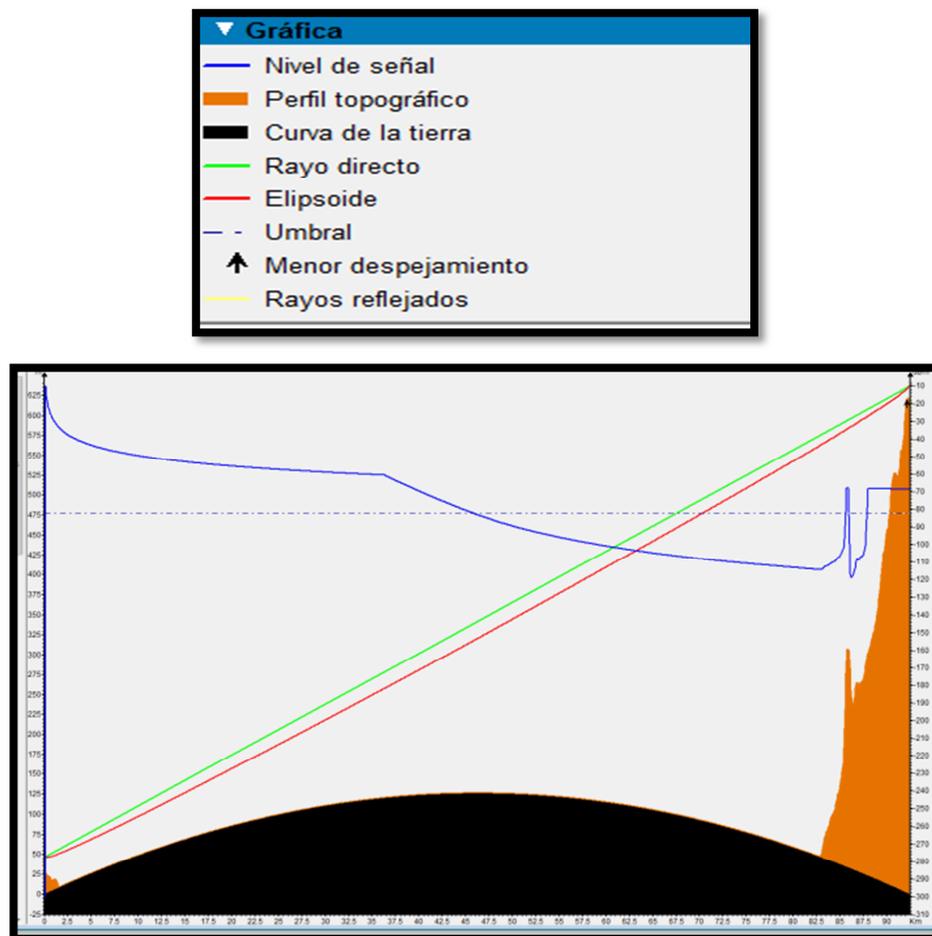


Figura 39. Resultados con 802.11n de 20 MHz.

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación mediante SIRENET)

Tabla 16. Resultados con valores del 802.11n de 20 MHz.

	TRANSMISOR	RECEPTOR	PERFIL	
Nombre	La Vertiente	Cerro San Joaquín	Método estadístico	UIT 526.10
Cota	27 [m]	606 [m]	Factor k	1.3333
Alt. Antena	20 [m]	20 [m]	Puntos	926
Polarización	Horizontal	Horizontal	Longitud	92.414 [km]
Frecuencia	5500 [Hz]	5500 [Hz]	Acimut	100.811°
MTFR	5 h	5 h	Potencia recibida	-68.5429[dBm]
Servicio	5.5 GHz – 20 MHz BW	5.5 GHz – 20 MHz BW	PRA en perfil	149.341 [W]
Velocidad	2 Mbps	2 Mbps	Pérdida total	146.572 [dB]
Modulación	4-PSK	4-PSK	Pérdida básica	146.572 [dB]

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

Los resultados en la simulación presentados en la Figura 39 tienen una factibilidad positiva debido a que el enlace si tiene línea de vista entre el transmisor y receptor, mientras que la potencia de recepción alcanza los -68.5429 dBm superior a la sensibilidad de los equipos, concluyendo que si existe comunicación entre los dos puntos.

- **Resultados con 802.11n de 40 MHz. en Sirenet**

Los resultados del enlace entre los cerros La Vertiente y San Joaquín se presentan en la figura 40 y el resumen de las características del enlace se encuentra en la tabla 17. En el análisis con ancho de banda de 40 MHz también presenta la factibilidad del enlace, ya que si existe línea de vista entre el transmisor y receptor donde se realizara el estudio de la red, con una potencia de recepción de -71.086 dBm, siendo superior a la sensibilidad de los equipos utilizados, indicando que si existe comunicación entre los dos puntos.

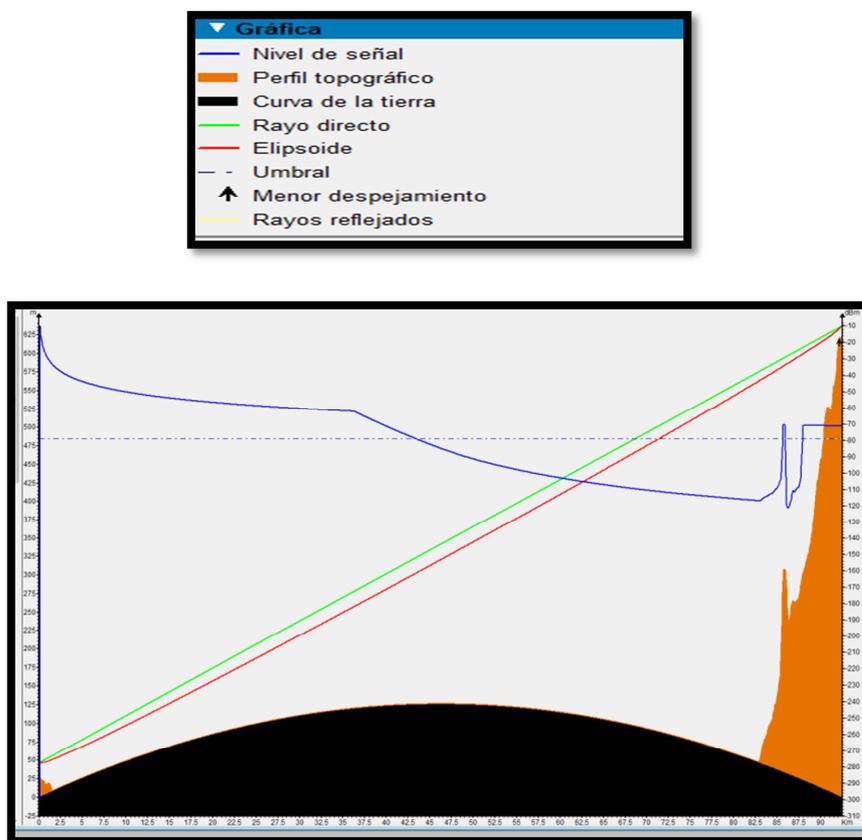


Figura 40. Resultados con 802.11n de 40 MHz.

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación mediante SIRENET)

Tabla 17. Resultados con 802.11n de 40 MHz

	TRANSMISOR	RECEPTOR		PERFIL
Nombre	La Vertiente	Cerro San Joaquín	Método estadístico	UIT 526.10
Cota	27 [m]	606 [m]	Factor k	1.3333
Alt. Antena	20 [m]	20 [m]	Puntos	926
Polarización	Horizontal	Horizontal	Longitud	92.414 [km]
Frecuencia	5500 [Hz]	5500 [Hz]	Acimut	100.811°
MTFR	5 h	5 h	Potencia recibida	- 71.086[dBm]
Servicio	5.5 GHz – 40 MHz BW	5.5 GHz – 40 MHz BW	PRA en perfil	149.341 [W]
Velocidad	2 Mbps	2 Mbps	Pérdida total	146.572 [dB]
Modulación	4-PSK	4-PSK	Pérdida básica	146.572 [dB]

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

- **Resultados con WiMAX fijo en Sirenet**

Modelo De Propagación Para WiMAX

El modelo de propagación utilizado en WiMAX es el modelo editable ampliado, ya en ninguno de los otros métodos se adapta a las condiciones reales del entorno, para esto SIRENET tiene este modelo para poder modificar los coeficientes de los factores que influyen en las pérdidas básicas.

a) Calculo de propagación

El modelo de propagación modificado es el modelo SUI. Para determinar la veracidad del modelo de propagación seleccionado, los cálculos realizados son los siguientes:

DATOS:

$hb = \text{altura estacion base}$

$h_{CPE} = 20 \text{ m}$

$d_0 = 1000 \text{ m} \rightarrow \text{distancia de referencia menor a la del enlace}$

b) Condiciones Del Terreno

A, B, C : constantes que dependen de la categoría del terreno

Tabla 18. Condiciones del terreno

	Categoría A	Categoría B	Categoría C
A	4.6	4	3.6
B	0.0075	0.0065	0.005
C	12.6	17.1	20

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

$$L_b(dB) = A + 10 \gamma \log\left(\frac{d}{d_o}\right) + s \quad (4.1)$$

$$A = 20 \log\left(\frac{4 \pi d_o}{\lambda}\right) \quad (4.2)$$

$$A = 20 \log\left(\frac{4 \pi d_o f}{c}\right) = 20 \log\left(\frac{4 \pi d_o f}{3 \times 10^8}\right) \quad (4.3)$$

$$\gamma = a - bh_b + \frac{c}{h_b} \quad (4.4)$$

Dónde: $d_o = 1000$ [m] y $8.2 \text{ dB} < s < 10.6 \text{ dB}$

Frecuencia Extendida

$$L_b(dB) = A + 10 \gamma \log\left(\frac{d}{d_o}\right) + s + \Delta L_{bf} + \Delta L_{bh} \quad (4.5)$$

$$\Delta L_{bf} = 6 \log\left(\frac{f[\text{MHz}]}{2000}\right) = 6 \log(f) - 19.8 \rightarrow f[\text{MHz}] \quad (4.6)$$

$$\Delta L_{bh} = -20 \log\left(\frac{h}{2}\right) = -20 \quad (4.7)$$

$$\gamma = 3.6 - 0.005(20) + \frac{20}{20} = 3.5 \quad (4.8)$$

$$A = 20 \log\left(\frac{4 \pi 1000 f[\text{Hz}]}{3 \times 10^8}\right) = 20 \log\left(\frac{f[\text{Hz}]}{23873,2}\right) \quad (4.9)$$

$$A = 20 \log(f[\text{Hz}]) - 87.55 \quad (4.10)$$

$$L_b(dB) = A + 10 \gamma \log\left(\frac{d}{d_o}\right) + s + \Delta L_{bf} + \Delta L_{bh} \quad (4.11)$$

Reemplazamos la ecuación 4.11 con los valores obtenidos en 4.10 , 4.8. y

nos queda:

$$L_b(dB) = -87.55 + 20 \log(f[Hz]) + 10 (3.5) \log\left(\frac{d[m]}{1000}\right) + 9 \quad (4.12)$$

$$L_b(dB) = -87.55 + 20 \log(f[Hz]) + 35 \log(d[m]) - 10(3.5)\log(1000) + 9 \quad (4.13)$$

$$L_b(dB) = -183.55 + 20 \log(f[Hz]) + 35 \log(d[m]) \quad (4.14)$$

Transformamos unidades de Hz a MHz, y metros a kilómetros.

$$L_b(dB) = -183.55 + 100 + 20 \log(f[MHz]) + 41.66 \log(d[km]) + 125 \quad (4.15)$$

$$L_b(dB) = 41.45 + 20 \log(f[MHz]) + 41.66 \log(d[km]) \quad (4.16)$$

$$L_b(dB) \text{Modificado} \quad (4.17)$$

$$= 41.45 + 20 \log(f[MHz]) + 41.66 \log(d[km]) - 20 + 6 \log(f[MHz]) - 19.8$$

$$L_b(dB) \text{Modificado} = 1.65 + 41.66 \log(d[km]) + 26 \log(f[MHz]) \quad (4.18)$$

El modelo SUI es el más apropiado para realizar dimensionamiento o planeación de un enlace y diseño detallado en una red WiMAX como se especificó en el capítulo anterior.

The screenshot shows a software interface for configuring the SUI model. At the top, there is a text field labeled 'Nombre:' with the value 'SUI'. Below this, there are two main sections. The left section contains 'Factor K:' with a value of '1.3333' and 'Resolución:' with a value of '100' and the unit 'm/pixel'. The right section is titled 'Método:' and is set to 'Editable Ampliado'. It contains several checked and unchecked options: 'Atenuación por gases' (checked), 'Atenuación por reflexiones' (unchecked), and 'Atenuación por lluvia' (checked). Under 'Atenuación por gases', there is a sub-option 'Densidad vapor agua:' with a value of '7.5' and the unit 'gr/m³'. Under 'Atenuación por lluvia', there is a sub-option 'Precipitaciones (R_{0.01%}):' with a value of '25' and the unit 'mm/h', and another sub-option 'Tiempo asegurado:' with a value of '0.01' and the unit '%'. The interface has a light gray background and a dark border.

Figura 41. Parámetros de cálculo para el modelo de propagación en WiMax

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación mediante SIRENET)



Figura 42. Perfil de cobertura con WiMAX fijo

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación mediante SIRENET)

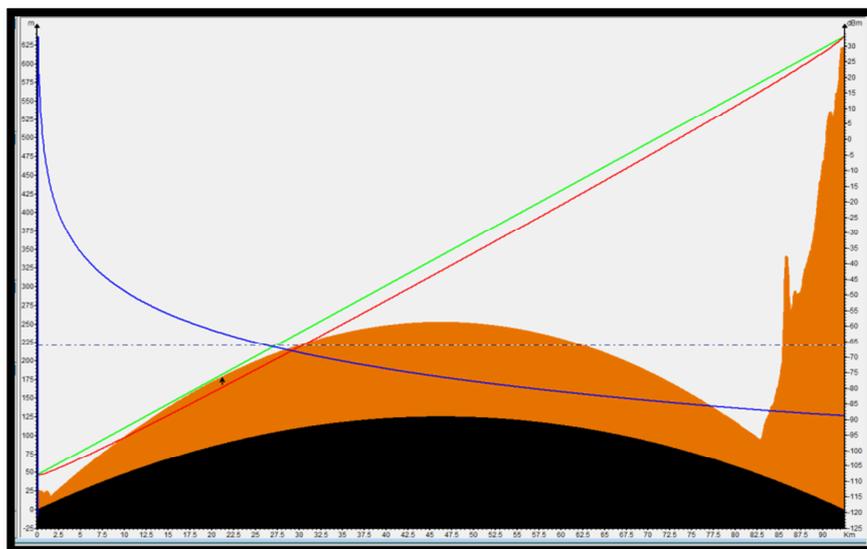
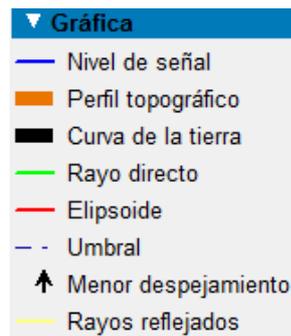


Figura 43. Resultado con WiMAX fijo

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación mediante SIRENET)

Tabla 19. Resultados con WiMAX fijo

	TRANSMISOR	RECEPTOR		PERFIL
Nombre	Cerro La Vertiente	Cerro San Joaquín	Método estadístico	Editable ampliado
Cota	27 [m]	606 [m]	Factor k	1.3333
Alt. Antena	20 [m]	20 [m]	Puntos	926
Polarización	Horizontal	Horizontal	Longitud	92.414 [km]
Frecuencia	5750 [Hz]	5750 [Hz]	Acimut	100.811°
MTFR	5 h	5 h	Potencia recibida	- 88.7276dBm]
Servicio	WiMAX Fijo	WiMAX Fijo	PRA en perfil	149.341 [W]
Velocidad	2 Mbps	2 Mbps	Pérdida total	146.572 [dB]
Modulación	4-PSK	4-PSK	Pérdida básica	146.572 [dB]

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

En el análisis con tecnología WiMAX fijo también presenta la factibilidad del enlace, ya que si existe línea de vista entre el transmisor y receptor, a pesar de que tener una potencia de recepción de -88.72dBm al límite de la sensibilidad, todavía si existe comunicación pero no tan eficiente como con la tecnología WiFi.

- **Resultados con Equipos propietarios Motorola utilizando PTP LINKPlanner.**

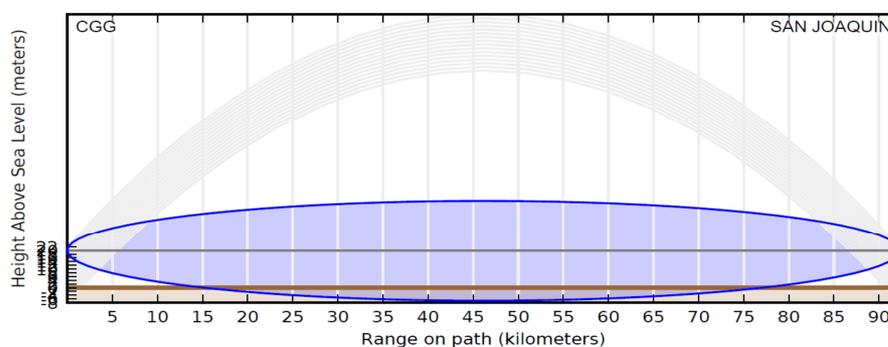


Figura 44. Enlace Cerro La Vertiente – San Joaquín

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación mediante PTPLink Planner)

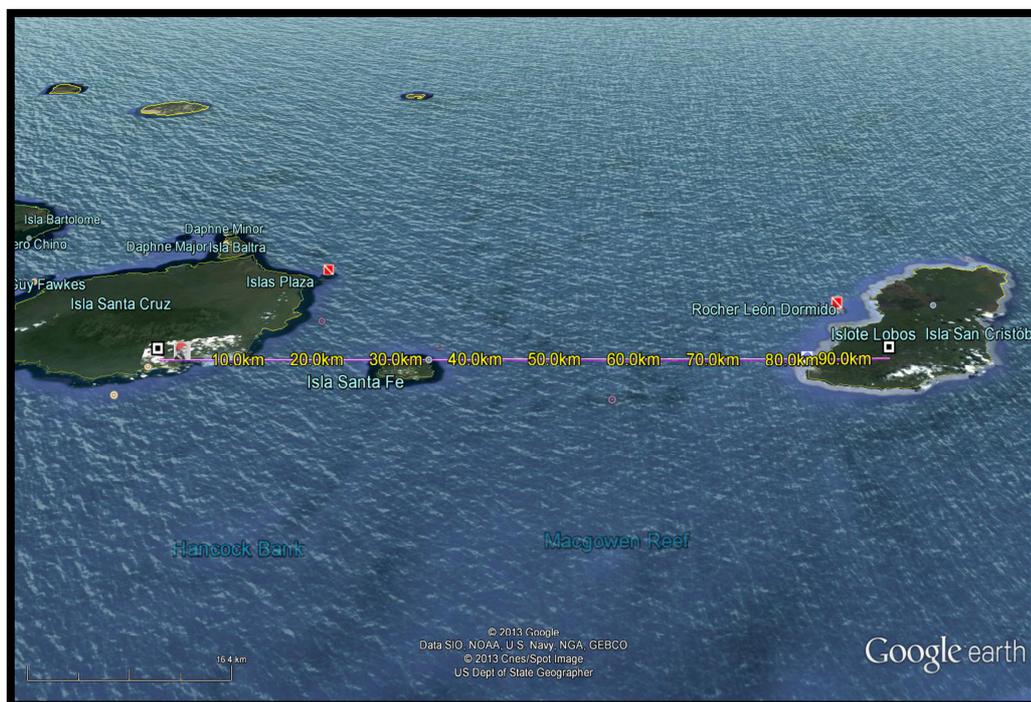


Figura 45. Enlace La Vertiente - San Joaquín

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación mediante Google earth)

Tabla 20. Rendimiento del enlace

Long. del enlace	92.264 km	Ganancia del sistema	151.91 dB
Banda	5.8 GHz	Margen de la ganancia	3.79 dB
Regulación	Full potencia	Velocidad de datos media	7.3 Mbps
Modulación	Adaptativa	Disponibilidad anual del enlace	77.902 %
Ancho de banda	15 MHz	No disponibilidad anual del enlace	80.7 días/año
Pérdida total	148.12 dB		

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

Tabla 21. Resultados con Equipos Motorola La Vertiente – San Joaquín

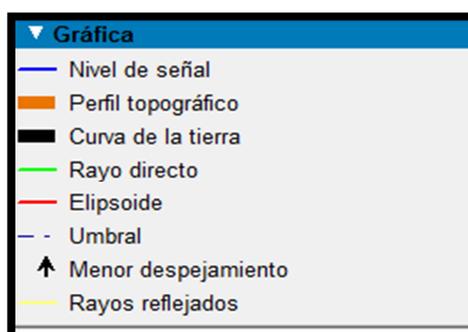
	TRANSMISOR	RECEPTOR		PERFIL
Nombre	Cerro La Vertiente	Cerro San Joaquín	Potencia Transmitida	25 [dBm]
Elevación	41 [m]	606 [m]	Interferencia	-77.2 [dBm]
Alt. Antena	20 [m]	20 [m]	Antenas	27.9 [dBi]
Frecuencia	5800 [MHz]	5800 [MHz]	Longitud	92.414 [km]
BW del canal	15 MHz	15 MHz	Potencia recibida	-70 [dBm]
Velocidad	3.66 Mbps	3.66 Mbps	Pérdida total	148.12 [dB]
Modulación	Adaptativa	Adaptativa	Throughput	7.32 Mbps

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

4.5.2 Enlace Cerro Crocker – Cerro San Joaquín

Figura 46. Parámetros Transmisor

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación mediante SIRENET)



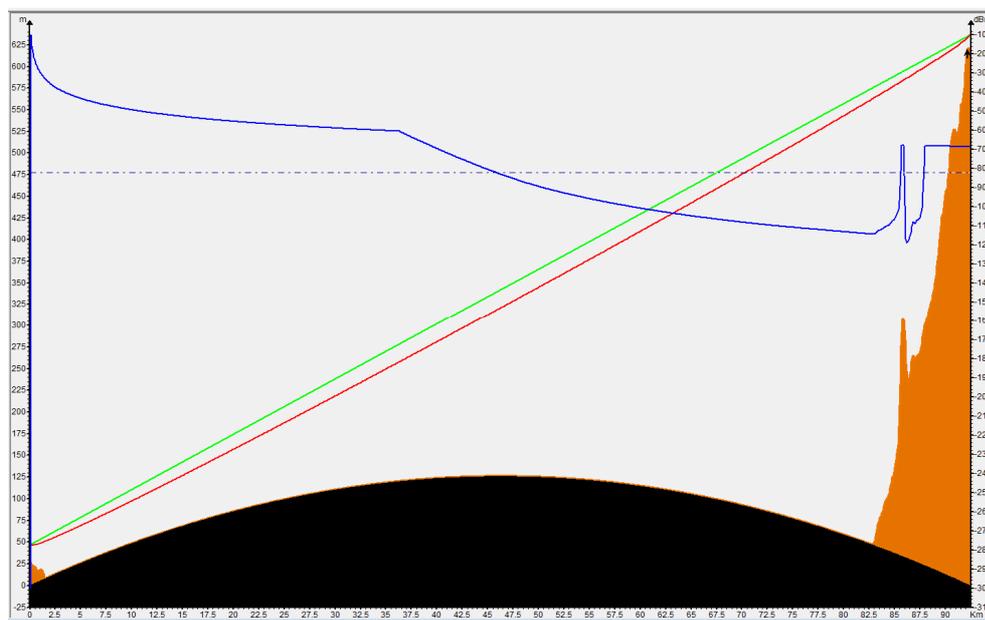


Figura 47. Resultado con 802.11n de 20 MHz.

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación mediante SIRENET)

Tabla 22. Resultados con 802.11n de 20 Hz

	TRANSMISOR	RECEPTOR	PERFIL	
Nombre	Cerro Crocker	Cerro San Joaquín	Método estadístico	UIT 526.10
Cota	808 [m]	606 [m]	Factor k	1.3333
Alt. Antena	20 [m]	20 [m]	Puntos	962
Polarización	Horizontal	Horizontal	Longitud	96.055 [km]
Frecuencia	5500 [Hz]	5500 [Hz]	Acimut	107.219°
MTRF	5 h	5 h	Potencia recibida	-
Servicio	5.5 GHz – 20 MHz BW	5.5 GHz – 20 MHz BW	PRA en perfil	149.341 [W]
Velocidad	2 Mbps	2 Mbps	Pérdida total	146.908 [dB]
Modulación	4-PSK	4-PSK	Pérdida básica	146.908[dB]

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

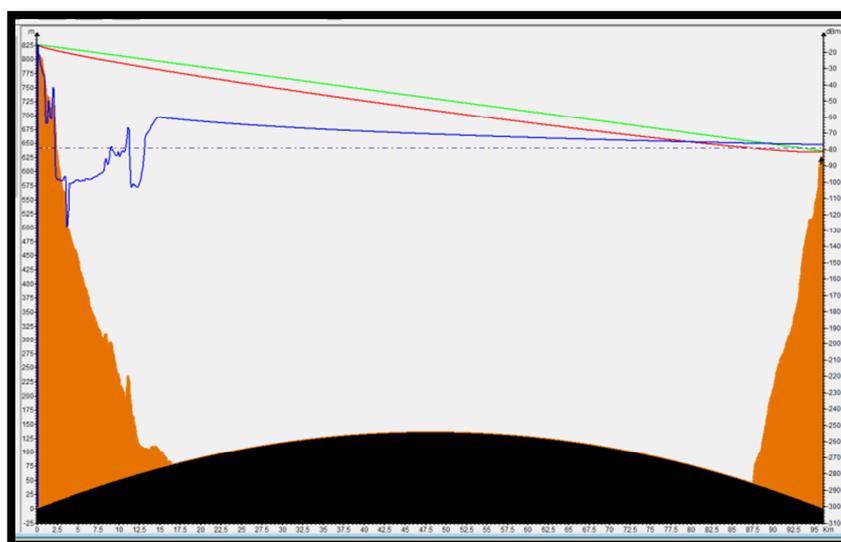


Figura 48. Resultado con 802.11n de 40 MHz.

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación mediante SIRENET)

Tabla 23. Resultados con 802.11n de 40 Hz

	TRANSMISOR		RECEPTOR		PERFIL
Nombre	Cerro Crocker		Cerro	San	Método estadístico
Cota	808 [m]		Joaquín		UIT 526.10
Alt. Antena	20 [m]		20 [m]		Factor k
Polarización	Horizontal		Horizontal		Puntos
Frecuencia	5500 [Hz]		5500 [Hz]		Longitud
MTFR	5 h		5 h		Acimut
Servicio	5.5 GHz – 40 MHz BW	5.5 GHz – 40 MHz BW			Potencia recibida
Velocidad	2 Mbps	2 Mbps			PRA en perfil
Modulación	4-PSK	4-PSK			Pérdida total
					Pérdida básica

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación mediante SIRENET)

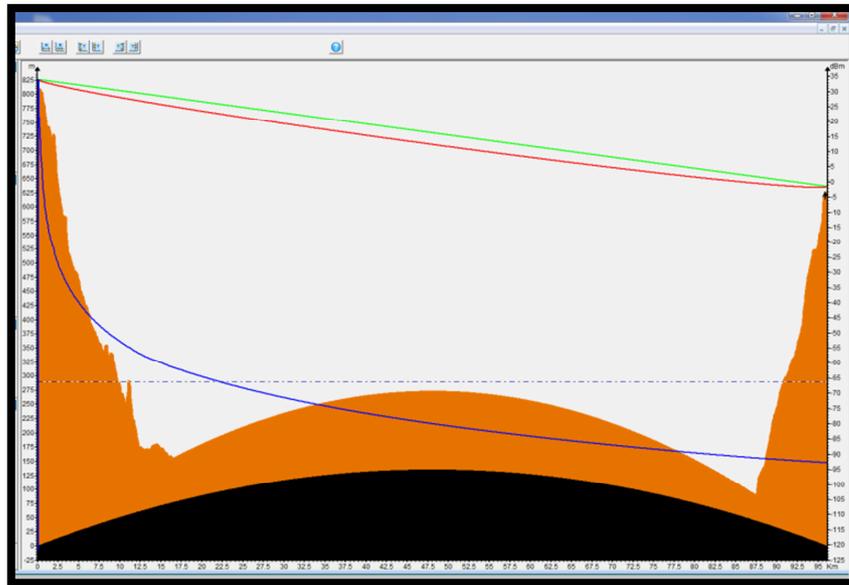


Figura 49. Resultado con WiMAX fijo

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación mediante SIRENET)

Tabla 24. Resultados con WiMAX fijo

	TRANSMISOR	RECEPTOR		PERFIL
Nombre	Cerro Crocker	Cerro San Joaquín	Método estadístico	Editable ampliado
Cota	808 [m]	403 [m]	Factor k	1.3333
Alt. Antena	20 [m]	20 [m]	Puntos	962
Polarización	Horizontal	Horizontal	Longitud	96.055[km]
Frecuencia	5750 [Hz]	5750 [Hz]	Acimut	107.219°
Servicio	WiMAX Fijo	WiMAX Fijo	Potencia recibida	-92.73[dBm]
Velocidad	2 Mbps	2 Mbps		
Modulación	4-PSK	4-PSK		

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

Los resultados para los equipos Motorola se muestran a continuación:

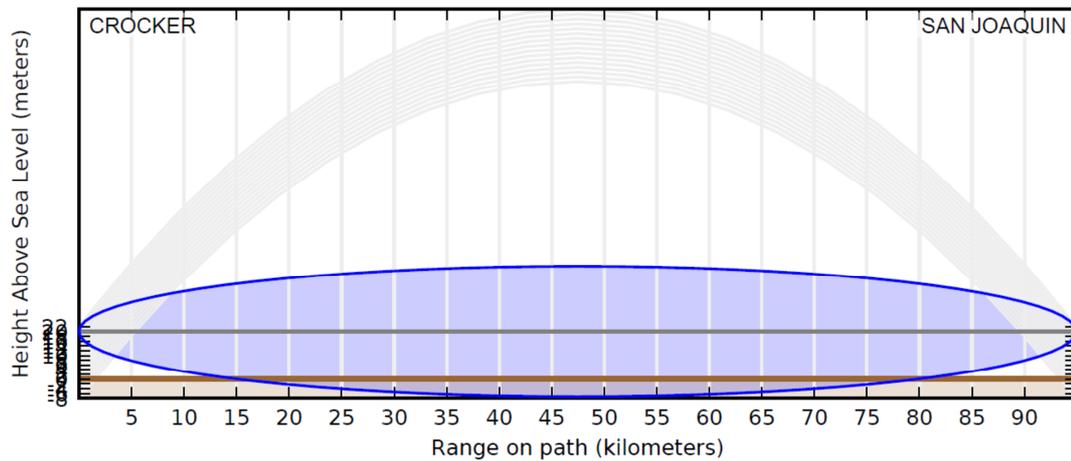


Figura 50. Enlace Crocker - San Joaquín

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación mediante PTPLink Planner)

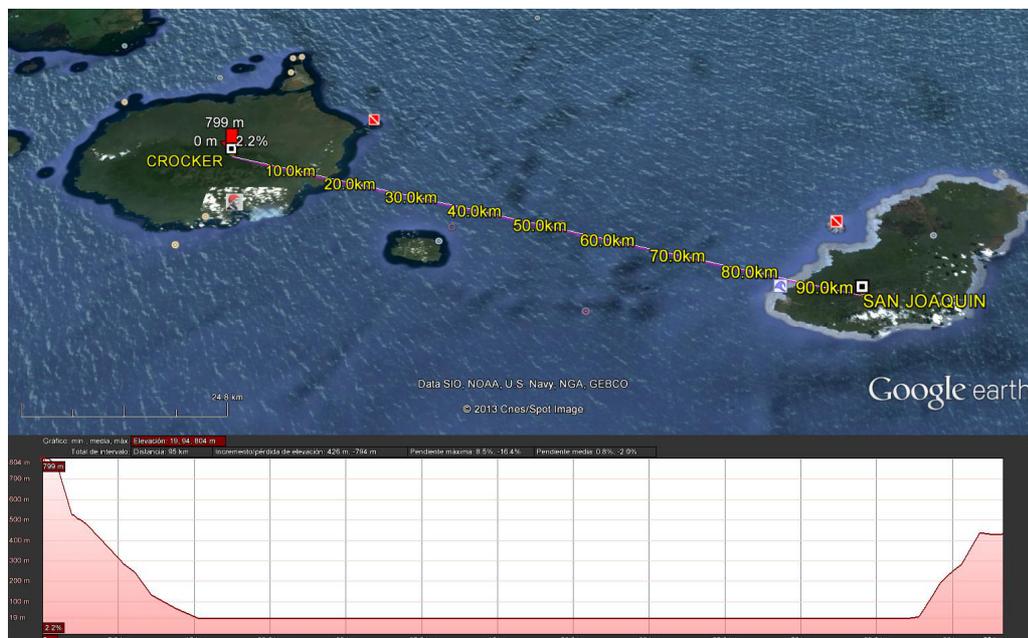


Figura 51. Perfil del Enlace

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación mediante Google earth)

Tabla 25. Resultados Motorola Crocker - San Joaquín

	TRANSMISOR	RECEPTOR		PERFIL
Nombre	Cerro Crocker	Cerro San Joaquín	Potencia Transmitida	25 [dBm]
Elevación	806 [m]	403 [m]	Interferencia	-79.5 [dBm]
Alt. Antena	20 [m]	20 [m]	Antenas	27.9 [dBi]
Frecuencia	5800 [MHz]	5800 [MHz]	Longitud	92.414 [km]
BW del canal	15 MHz	15 MHz	Potencia recibida	-71 [dBm]
Velocidad	4.85 Mbps	4.85 Mbps	Pérdida total	148.4 [dB]
Modulación	Adaptativa	Adaptativa	Throughput	9.69 Mbps

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

Los resultados obtenidos en la simulación con 802.11n de 20 MHz, 802.11n de 40 MHz, WiMAX fijo y con equipos Motorola son favorables ya que la potencia de recepción es mayor a la sensibilidad de los equipos, además se puede observar que no existen obstáculos entre los enlaces. Estas características del enlace permiten que no sea necesario utilizar repetidoras, optimizando recursos.

El modelo de propagación utilizado SUI editable ampliado, define una serie de fórmulas para el cálculo de pérdida de propagación como parámetros para realizar balance en el enlace. Para la realización de este proyecto al utilizar frecuencias mayores a 3000 Hz y una distancia de 92 km se debe realizar modificaciones empleando factores de corrección tanto de frecuencia como en distancia.

4.6 Selección de los lugares de la red a implementarse.

Para la elección de los lugares se tomó en consideración las facilidades físicas, técnicas y administrativas, así como los lugares que presentaron las mejores características para el enlace según las simulaciones. Como se mencionó antes, fue necesaria la obtención de los permisos respectivos para el despliegue de la red.

En el diseño es muy importante recalcar la ubicación de los sitios es por esto que se escogió los puntos más elevados de cada isla para la instalación de la antena, para tener una buena calidad de recepción, especialmente en presencia de fuentes de interferencia locales, la torre seleccionada para el enlace en la isla de San Cristóbal es la torre del cerro San Joaquín, ya que se encuentra ubicada en el punto más alto de toda la isla evitando obstrucciones y así tener línea de vista. En la isla Santa Cruz el punto seleccionado fue el cerro Crocker por ser la cima más alta de la isla evitando obstrucciones significativas para un mayor enlace.

4.6.1 Cerro San Joaquín (San Cristóbal)

Se escogió porque tenía las mejores prestaciones de seguridad, ya que está ubicada en un lugar remoto de difícil acceso para personas, y la Armada del Ecuador presta los servicios de seguridad. Además de esto, cuenta con infraestructura apropiada como una caseta, torre auto soportada, cerramiento y cuenta también con red eléctrica.

4.6.2 Cerro Crocker (Santa cruz)

Este sitio fue seleccionado debido a las facilidades brindadas por las autoridades del Parque Nacional Galápagos referentes a permisos concedidos e instalaciones,

además que presenta una mayor facilidad para la instalación de los equipos de telecomunicaciones. Otra de las características de este sitio es que está ubicado en un lugar donde existe perfecta línea de vista con el otro nodo a realizarse el enlace, y comprobando con las simulaciones realizadas, el emplazamiento en el Cerro Crocker es un buen punto para tomarlo como referencia en la red a implementarse, además que también cuenta con una factibilidad de terreno, torre auto sustentada, energía eléctrica y caseta.

4.7 Validación del diseño de red.

Luego de un análisis completo tanto en las herramientas de simulación SIRENET y PTP LINKPlanner, así como en la visita de campo se concluye, que la red a instalar queda conformada por un transmisor y un receptor sin necesidad de repetidoras por lo que en este tipo de entorno si existe facilidad de línea de vista ya que no son terrenos montañosos con alturas bajas. La topología de la red se detalla en la Figura 52:

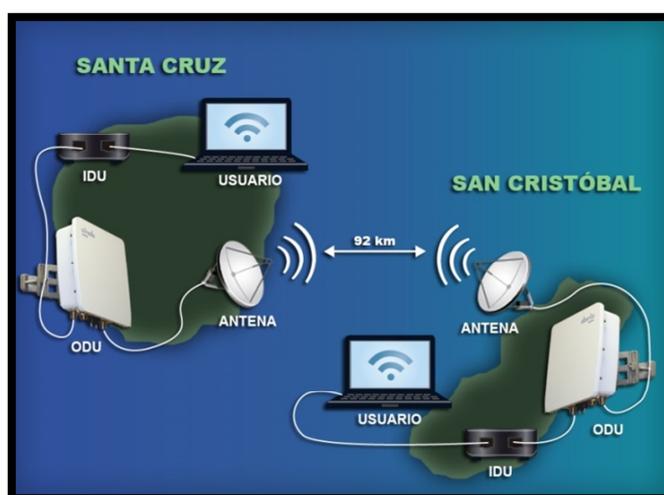


Figura 52. Topología de la red a implementarse

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

La instalación se realizara entre los cerros más altos de cada isla que será en el Cerro Crocker (Isla Santa Cruz) y en el Cerro San Joaquín (Isla San Cristóbal) con una distancia de 93 km. Mediante el estudio de propagación realizado entre el emplazamiento ubicado en la isla Santa Cruz y la isla San Cristóbal, se pudo observar que existe una perfecta línea de vista y la señal en todo su trayecto se encuentra libre de obstáculos, en dichas condiciones la altura de las antenas puede ir sobre torres de 20 [m]. Las alturas de las antenas fueron determinadas en la visita de campo a los nodos para realizar el enlace, para así poder garantizar que la primera zona de Fresnel sea al menos de un 60%.

Las condiciones climáticas en la isla Santa Cruz por tener sus antenas en las oficinas tanto del Parque Nacional como en el Consejo de Gobierno tienen una factibilidad al momento de instalar la antena transmisora, con torres de 20 m de altura así permitiendo la instalación con mayor precisión, no obstante en la isla San Cristóbal las condiciones climáticas no son tan favorables ya que por tener las antenas en el Cerro San Joaquín y ser un cerro con 600 m de altura sobre el nivel del mar, existe mucho viento y lluvia lo cual hace que la instalación sea más complicada.

4.8 Manejo de equipos

En esta sección se realiza la selección de los equipos a ser utilizados en el enlace inalámbrico de larga distancia, los cuales deben cumplir con escalabilidad, manejabilidad y calidad de servicio lo que dicen las normas de la IEEE 802.11n, así como también se debe cumplir las normas regidas por los entes reguladores en cuanto a potencias y emisiones de RF.

Como se analizó en el capítulo 3, los equipos Motorola brindan muchas facilidades técnicas tales como tener una sensibilidad adaptativa entre -98 dBm y -58 dBm, además de brindar una modulación dinámica que se adapta entre BPSK simple y 256 QAM dual. Con estas características, se saca el mayor provecho a la red inalámbrica y a las condiciones del entorno en donde se desenvuelve. Además es un equipo muy robusto y que entre sus especificaciones soporta los niveles de factores climáticos de la zona donde se van a instalar. Otra de las razones por las cuales se escogió este equipamiento, son las facilidades de instalación y alineamiento de las antenas, así como el software de simulación de Motorola que permite tener una simulación de la red con una precisión de hasta 5 números 9, es decir hasta un 99.999% de certeza del valor simulado. Los equipos Motorola soportan una máxima potencia de transmisión de 95 dBm.

Los equipos seleccionados para ser utilizados fueron Motorola PTP 58600, que debido a sus características propias de potencia de transmisión, umbral de recepción, temperatura y humedad soportada, son equipos robustos lo cual ayuda a realizar un mejor enlace ya que se pueden realizar ciertas modificaciones, además de las regulaciones y facilidades propias del Concejo de Gobierno de Galápagos.

Con las especificaciones previas, la red se fijó entre el cerro Crocker y San Joaquín, utilizando los equipos propietarios Motorola PTP 58600. En este enlace se espera una *throughput* de 9.69 Mbps.

4.8.1 Instalación de equipamiento

Para realizar la instalación de los equipos Motorola PTP para largas distancias es necesario modificar los siguientes aspectos:

- Aumentar la potencia de transmisión: Está limitado de acuerdo al reglamento del país y del equipo mismo, siendo esta de 25 dBm.
- Aumentar la ganancia de las antenas: Es necesario tener equipos de radio que permitan conectar antenas externas las cuales tengan una mejor ganancia. Las antenas deben ser directivas debido a que éstas brindan una mejor prestación para enlaces de larga distancia. Las antenas utilizadas en el enlace son de 27.9 dBi.
- Disminuir las pérdidas en los cables de antena: Es necesario utilizar cables y conectores de buena calidad para disminuir el efecto de pérdidas de nivel de señal del enlace, además se reduce las pérdidas cuando el equipo de radio está más cerca de la antena. Para Mejorar la sensibilidad del receptor: los equipos de radio necesitan tener mayor sensibilidad y ser capaces de trabajar a velocidades menores para que la sensibilidad aumente.
- Tener en cuenta el efecto del tiempo de propagación de señales de radio a largas distancias. A distancias de 93 km. el tiempo de propagación de las ondas influye para trabajar con el estándar 802.11n.

Las antenas tuvieron que ser instaladas en las torres en cada extremo del enlace seleccionado, con sus respectivos soportes. Una vez instaladas las antenas fue necesario alinearlas visualmente y luego conectarlas a sus respectivos radios, para medir la intensidad de señal recibida mediante software propio de los equipos.

Es necesario optimizar la alineación de las antenas, para lograr este objetivo, se mantiene una antena fija (Santa Cruz) y la otra antena (San Cristóbal), se la mueve para que apoyados con el software de los equipos Motorola, nos indiquen el punto de mayor calidad de señal recibida. Los equipos Motorola PTP de la serie de 600 tienen

integrados un sistema para facilitar la instalación y apuntamiento de la antena; este sistema consiste que el ancho del haz de la antena es mayor en la conexión inicial mientras que un tono de audio indica el punto óptimo de la señal recibida. Una vez realizado esto, se ajusta y mantiene fija la segunda antena (San Cristóbal) y se repite el procedimiento en la primera antena (Santa Cruz). El nivel de señal esperado es cercano al indicado en las simulaciones.

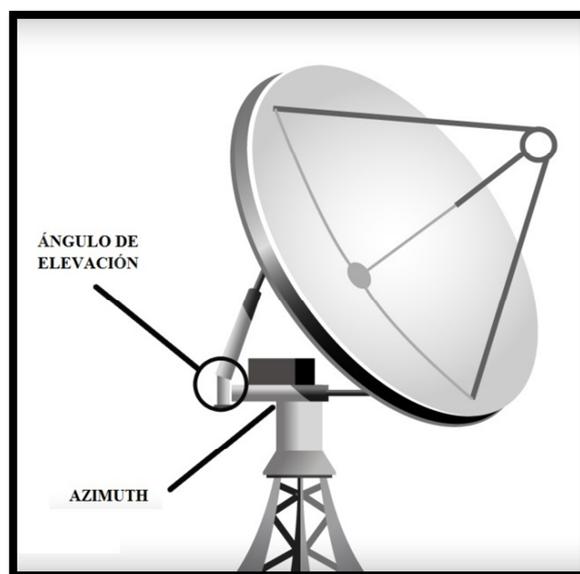


Figura 53. Alineación Antena

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

En la figura 53 se muestra la manera de mover la antena y poder conseguir el mejor nivel de señal posible. Para poder realizar una correcta alineación de antenas fue necesario el uso del GPS con brújula, las cuerdas y los teléfonos celulares para comunicarse con el otro extremo. Una vez alineadas las antenas se procede a proteger los conectores de las antenas con una cinta auto-fundente que es probada para ambientes externos y evitar pérdidas de señal en estos puntos.

CAPÍTULO V

PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Pruebas y mediciones

En este capítulo se realizan las pruebas de inyección de tráfico, las mismas que se analizarán para poder determinar el desempeño del protocolo TCP en entornos inalámbricos a larga distancia. Las pruebas del nivel de señal del enlace radioeléctrico se las realizó con el software de los equipos propietarios para determinar que el enlace está correctamente alineado y optimizado. Para las pruebas y mediciones del desempeño del protocolo TCP se utilizó el software D-ITG ya que es un software capaz de monitorear y capturar cualquier tipo de tráfico que circule en la red extremo a extremo, y con el tráfico capturado se pudo hacer el análisis respectivo para presentar las mediciones de los parámetros de calidad de servicio.

5.2 Pruebas de Campo

5.2.1 Descripción del Escenario

Una vez realizado el enlace inalámbrico entre Santa Cruz y San Cristóbal en Galápagos, se procedió a realizar las pruebas necesarias con el fin de poder evaluar el desempeño del protocolo TCP en largas distancias en la Región Insular. Para las

pruebas se utilizó el inyector de tráfico D – ITG con el fin de poder obtener y evaluar los diferentes parámetros de calidad de servicio, tales como *Bitrate*, *Jitter* y *Delay*.

Las pruebas se realizaron mediante la inyección de tráfico a la red por períodos de 5 minutos y con diferente cantidad de paquetes, para inyectar 1 Mb, 2 Mb, 3 Mb y 4 Mb. Este procedimiento fue repetido para poder evaluar y comparar el protocolo TCP normal respecto al protocolo TCP modificado propuesto en (Olmedo, 2008) e implementado en (Pilo-País, 2011) con ventanas de contención de 15 y 20.

Al ser TCP un protocolo orientado a la conexión se comprobó que las pérdidas de paquetes son nulas, ya que en caso de existir pérdidas por congestión de la red o por pérdida del enlace, dicho paquete se retransmite para garantizar que toda la información sea transmitida y receptada correctamente.

En la Figura 54, se puede observar un esquema conceptual del escenario utilizado para la realización de las pruebas necesarias para la elaboración de este trabajo investigativo.

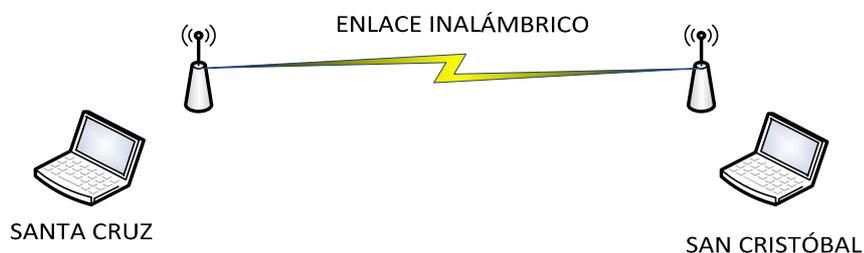


Figura 54. Escenario conceptual de pruebas

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

La red se configuró según se muestra en la tabla 26:

Tabla 26. Direccionamiento Lógico de la red implementada

Localización	Dirección IP Física	Dirección IP Virtual	Gateway
Santa Cruz (emisor)	192.168.70.10	192.168.10.100	192.168.10.1
San Cristóbal (receptor)	192.168.70.20	192.168.10.200	192.168.10.12

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

5.2.2 Pruebas de inyección de tráfico.

Para las pruebas de inyección de tráfico mediante el software D-ITG, se utilizó el procedimiento descrito en (Barrionuevo Zapata & Tamayo Vegas , 2011). Las pruebas realizadas consistieron en la inyección de tráfico de 5 minutos cada una con los 3 algoritmos de protocolo TCP (normal, ventana de contención de 15 y ventana de contención de 20) y con velocidades de transmisión de 1, 2, 3 y 4 Mbps. En la máquina virtual se selecciona el kernel apropiado en el cual se desea trabajar, como se muestra en la Figura. 55:



Figura 55. Selección del Kernel de Linux

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

Una vez seleccionado el Kernel de Linux correspondiente para cada una de las inyecciones de tráfico, se procede a configurar las direcciones lógicas de cada computador y realizar la prueba de conectividad tanto a nivel de la PC física como de la PC virtual, con esto se comprueba la conectividad entre las máquinas y se procede a realizar la inyección de tráfico.

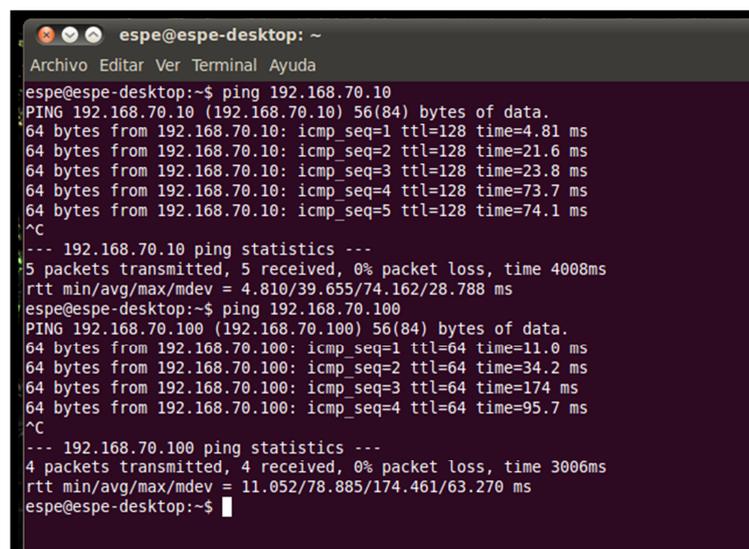


Figura 56. Prueba de Conectividad entre computadoras

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

En la Figura 56 se puede observar que existe conectividad entre las computadoras ubicadas en San Cristóbal y Santa Cruz con el direccionamiento a nivel lógico descrito anteriormente. Se puede observar que la conectividad entre las máquinas en San Cristóbal y Santa Cruz es a nivel físico y virtual.

En las pruebas de inyección de tráfico intervinieron dos máquinas que según el tipo de tráfico definido en cada momento, actuaron de emisoras o receptoras. En el apartado de *Define Flow*, se define el tipo de inyección que se va a generar, para el caso de flujo unidireccional la máquina que inyecta el tráfico (emisora), se configura como se muestra en la Figura 57.

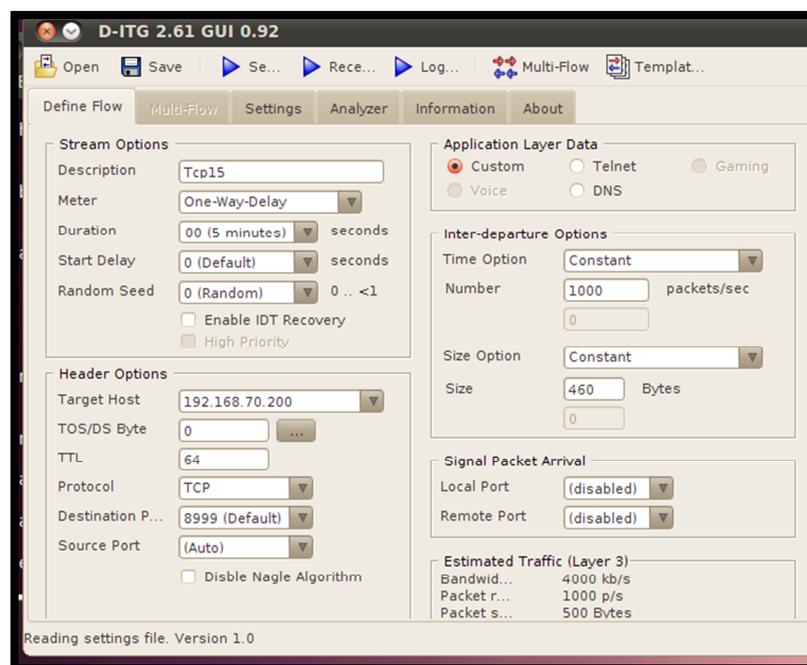


Figura 57. Inyección de Tráfico

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

Una vez ya definidos los parámetros de configuración se procede a seleccionar los tiempos en los cuales el usuario desea enviar el tráfico de datos, luego en el apartado de *Settings* se especificó los directorios donde se almacenan los datos que circulan en la red que son almacenados en un archivo denominado “.log” con el nombre del cliente el cual contiene los datos capturados por la tarjeta de red para luego ser procesados con los datos obtenidos del cliente, luego se obtiene unos ficheros *.dat* los cuales contienen información sobre los parámetros de calidad de servicio, estos ficheros son procesados en cualquier analizador de datos y generar las gráficas correspondientes para así poder obtener las medidas de calidad de servicio. El cliente captura los paquetes en el otro extremo y se inicia con la sincronización de los relojes para manejar mismos tiempos, y así evitar problemas en los cálculos posteriores, se define la interfaz de; usuario y los paquetes que se desean capturar. En la Figura 58 se puede observar cuando el programa D-ITG ya empieza a inyectar el tráfico a la red.

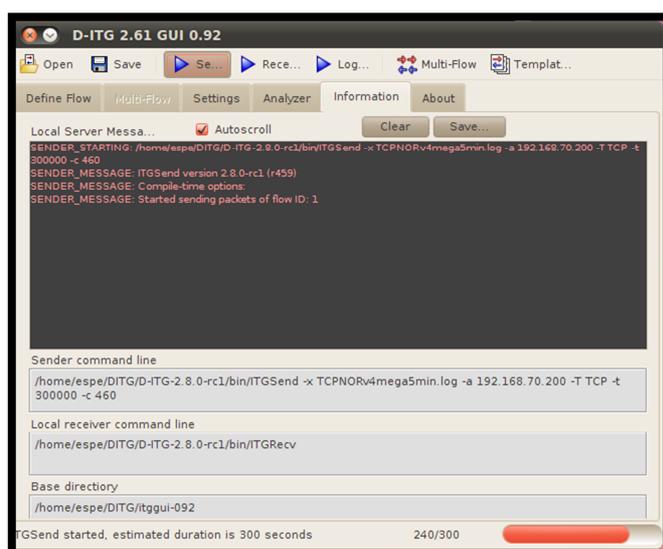


Figura 58. Inyección de tráfico en la red

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

Este procedimiento se lo realiza con las 3 versiones del algoritmo de TCP y en cada versión se lo realizó con diferentes velocidades, a 1, 2, 3 y 4 Mbps. Para concluir se realiza el análisis de los datos obtenidos y se procede a realizar las gráficas de los mismos para obtener una comparativa del desempeño de cada uno de los protocolos respecto al *Bitrate*, *delay* y *jitter*.

5.3 Análisis de Resultados:

- ***Bitrate:***

Conocido como flujo de datos, es el número de bits que son procesados por unidad de tiempo. También es referida como la tasa de transferencia y es un parámetro muy importante para evaluar el desempeño de las redes de datos, ya que permite analizar la velocidad con la que los datos son transmitidos entre dos terminales. Está ligado con la velocidad de transmisión, el ancho de banda del canal y el número de usuarios que comparten la red. En redes inalámbricas el *Bitrate* es inferior al ancho de banda principalmente debido al medio físico.

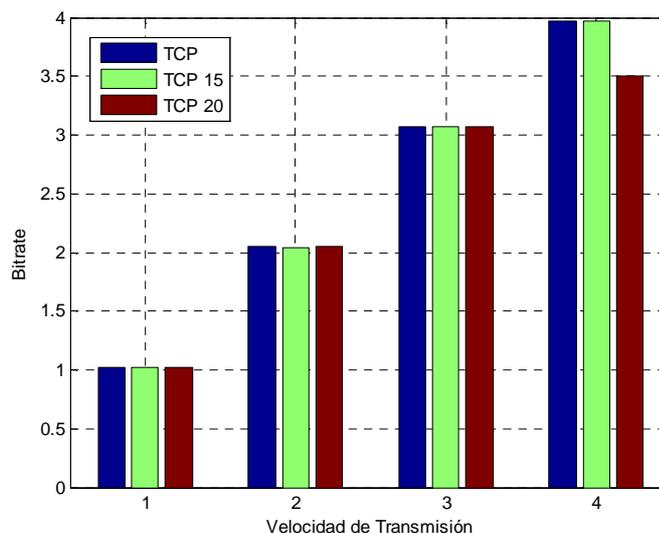


Figura 59. Tabulación de resultados *Bitrate*

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

En la figura 59, se puede observar de mejor manera el comportamiento del protocolo TCP original que es ligeramente superior al protocolo TCP modificado con ventana de congestión de 15 y 20 respectivamente. A una tasa de transmisión de 4 Mbps el protocolo TCP modificado con una ventana de 20 presenta menor desempeño que los otros 2 protocolos evaluados.

Como se puede observar en la tabla 27, se demuestra que la calidad del enlace es buena, ya que al utilizar el protocolo TCP en condiciones normales, se obtiene una tasa de transferencia muy parecida al tráfico inyectado a la red. La inyección de tráfico de datos se realizó con la velocidad de transmisión como se especificó en el capítulo 4, las simulaciones de la red inalámbrica determinan una velocidad máxima de 4 Mbps, ya que al aumentar la velocidad empezaba a decaer totalmente la calidad del enlace, en tal virtud se fueron realizando las pruebas con estas velocidades de transmisión.

Tabla 27. Resultados del *Bitrate*

<i>BITRATE</i>				
Velocidad[Mbps]	1 Mbps	2 Mbps	3 Mbps	4 Mbps
TCP Original	1.024	2.047	3.071	3.968
TCP Ventana 15	1.023	2.045	3.071	3.968
TCP Ventana 20	1.023	2.047	3.071	3.507

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

En las Figuras 60, 61, 62 y 63, se muestra el desempeño de cada uno de los protocolos a través del tiempo, durante los 5 minutos de inyección del tráfico. En dichas figuras se aprecia la comparación entre los protocolos TCP normal, TCP ventana de 15 y TCP ventana de 20, obteniendo casi el mismo rendimiento sobre redes inalámbricas con diferentes tasas de transmisión.

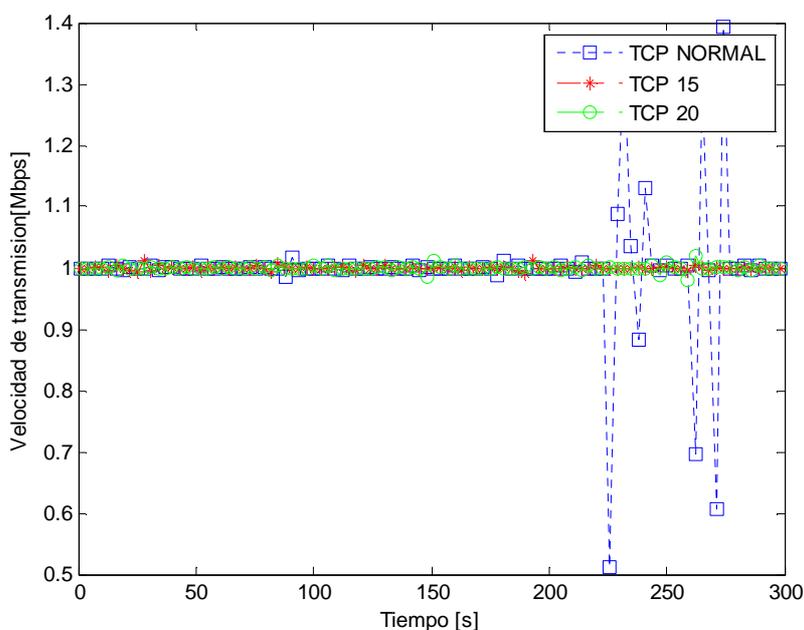


Figura 60. *Bitrate* a 1 Mbps

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

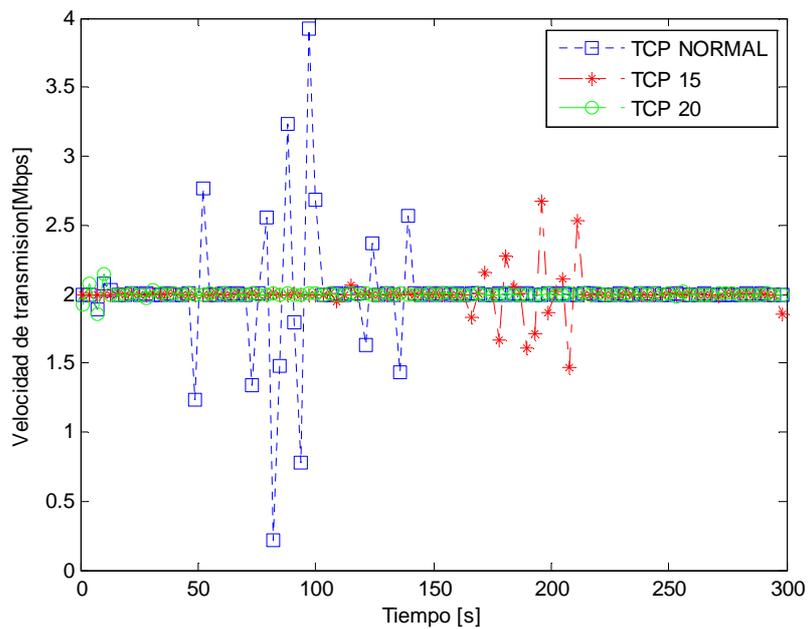


Figura 61. Bitrate a 2 Mbps
(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

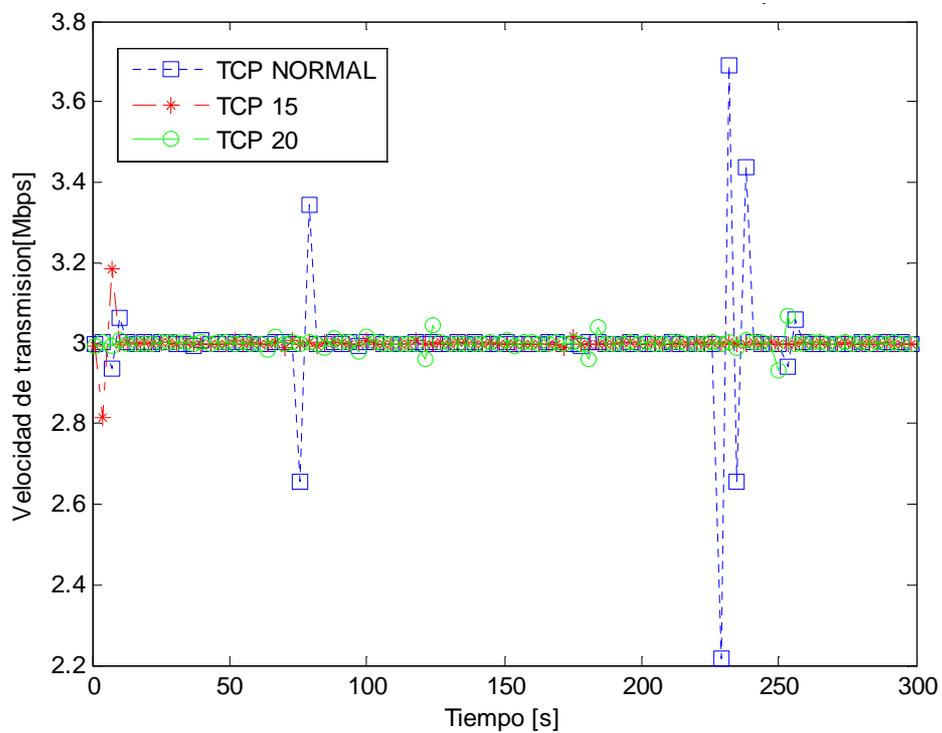


Figura 62. Bitrate a 3 Mbps
(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

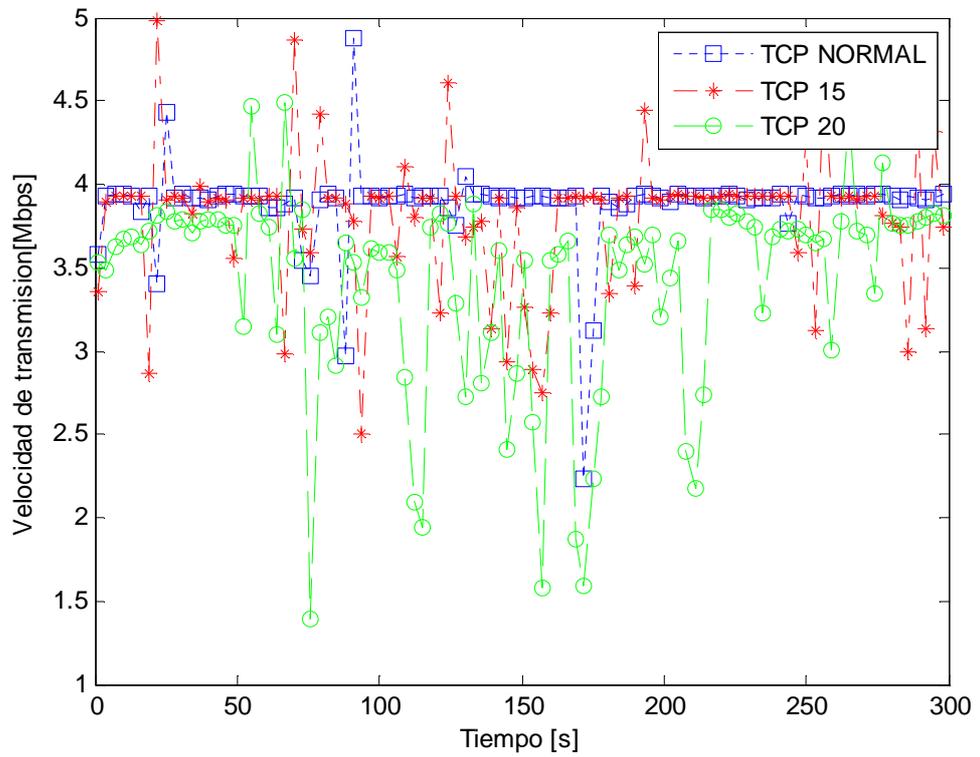


Figura 63. Bitrate a 4 Mbps
 (Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

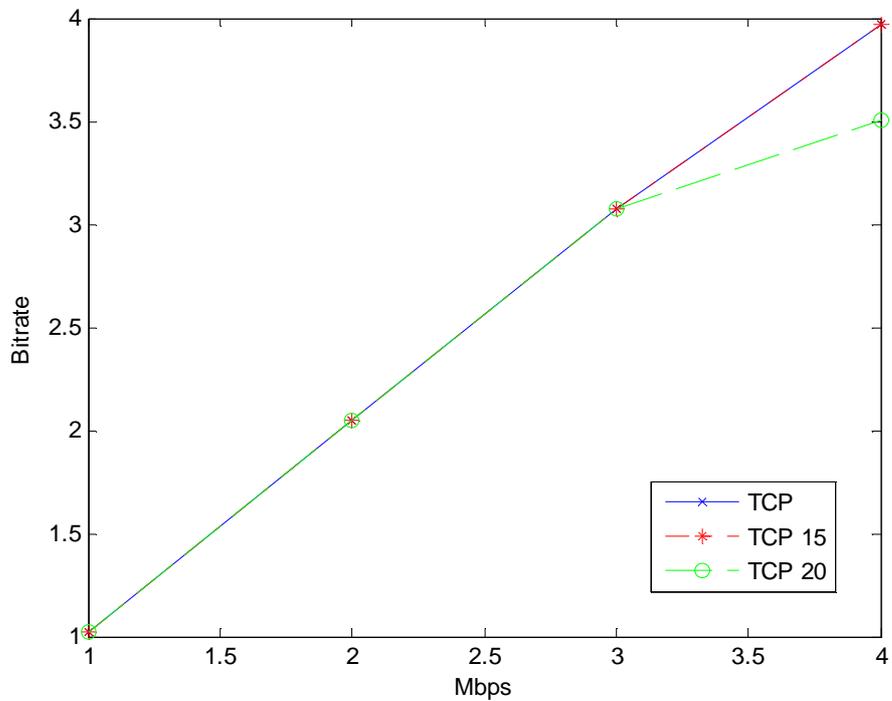


Figura 64. Consolidado Bitrate para las 3 versiones de TCP
 (Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

Otra consideración importante que se puede observar es que la red se comporta de manera óptima hasta los 3 Mbps, mientras que a los 4 Mbps, en todos los protocolos empiezan a disminuir su tasa de transmisión.

Se puede observar claramente que el protocolo TCP original y el protocolo TCP modificado con ventana de congestión de 15 presentan similares características. El protocolo TCP modificado con ventana de congestión de 20 tiene un rendimiento aceptable hasta los 3 Mbps, sin embargo a partir de los 3 Mbps empieza a tener un menor *Bitrate*. En la Figura. 64, se puede apreciar que el TCP original y el TCP de 15 se superponen, mientras que el protocolo TCP con ventana de congestión de 20 presenta un menor desempeño.

Rendimiento de la red

El rendimiento de una red de datos es la máxima cantidad de datos efectivos sin errores, está en función de la velocidad máxima de transferencia [bps] que se puede alcanzar en la red considerando el ancho de banda del medio y la modulación; y el otro factor es la latencia la cual relaciona el tiempo que toma un bit en viajar al otro extremo. Mediante el cálculo del throughput se podrá observar que tan efectivo es el canal en el que se está transmitiendo. Para obtener el throughput se debe tomar en cuenta la tecnología utilizada, así como también la ubicación entre el emisor y receptor. La tasa del throughput en una red inalámbrica esta entre el 30% al 60%.

En el capítulo 4 se determinó que la máxima cantidad de datos a transmitirse en la red fue de 4 Mbps. A mayores tasas de transferencia el canal empieza a bajar su efectividad y rendimiento, ya que por características propias de la red, de los equipos

utilizados, y demás variables presentes en el enlace, no es posible inyectar tráfico a velocidades mayores de 4 Mbps, obteniendo un ancho de banda disponible de 4 Mbps.

La velocidad de transmisión teórica se obtuvo mediante el simulador LINKPlanner de Motorola, el cual determino en base a la sensibilidad y características del enlace, obteniendo una tasa de transferencia teórica de 9.69 Mbps, este valor es bajo debido a las perdidas en el trayecto ocasionadas por distintos factores, en redes 802.11 de larga distancia la presencia de interferencias resulta en que decaiga el rendimiento del enlace y que la capacidad de la red disminuya.

Los equipos Motorola PTP 58600 tienen una sensibilidad entre -98 dBm y -58 dBm, en el enlace se alcanza una potencia de recepción de -71 dBm obteniendo así un rendimiento de la red del 41.3 %.

$$\eta = \frac{4[Mbps]}{9.69[Mbps]} \times 100\% = 41.28 \%$$

Este rendimiento es aceptable ya que se verá reflejado en la cobertura, calidad de servicio y disponibilidad de acceso, con este valor se está garantizando una tasa de transferencia confiable.

- ***Jitter:***

Es la variación en cuanto a la cantidad de latencia entre paquetes de datos que se reciben, esto significa que es el tiempo con el que llega cada paquete al receptor.

Cuando el *jitter* es de valores bajos, su comportamiento es despreciable, pero este parámetro puede afectar mucho a la calidad de servicio cuando tiene valores altos en relación a la red con la que se está trabajando, ya que afecta a la calidad de flujo que puede llegar a ser muy variable, esto se da por el retardo en el que un paquete varía impredeciblemente con su posición en las colas de los ruteadores y debido a también a los tiempos de espera de conexión, congestión del tráfico de datos y a la interferencia a lo largo del camino entre el transmisor.

En la Tabla. 28 se puede ver la variación del retardo o *jitter* en torno a las distintas tasas de transmisión, y con cada uno de los protocolos TCP en inyecciones de tráfico de 5 minutos. Se observa que el *jitter* decrece inversamente a la tasa de transmisión hasta los 3 Mbps, y a los 4 Mbps vuelve a tener una variación del retardo parecida a la obtenida a una velocidad de transmisión de 2 Mbps. En la figura 65 se puede observar de mejor manera la comparación de resultados del *jitter* utilizando los 3 algoritmos de TCP.

Tabla 28. Tabulación de resultados del Jitter

Velocidad[Mbps]	<i>JITTER</i>			
	1 Mbps	2 Mbps	3 Mbps	4 Mbps
TCP Original [s]	0.00464	0.00258	0.001644	0.002028
TCP Ventana de 15[s]	0.00442	0.00246	0.001591	0.001995
TCP Ventana de 20[s]	0.00442	0.00237	0.00163	0.002313

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

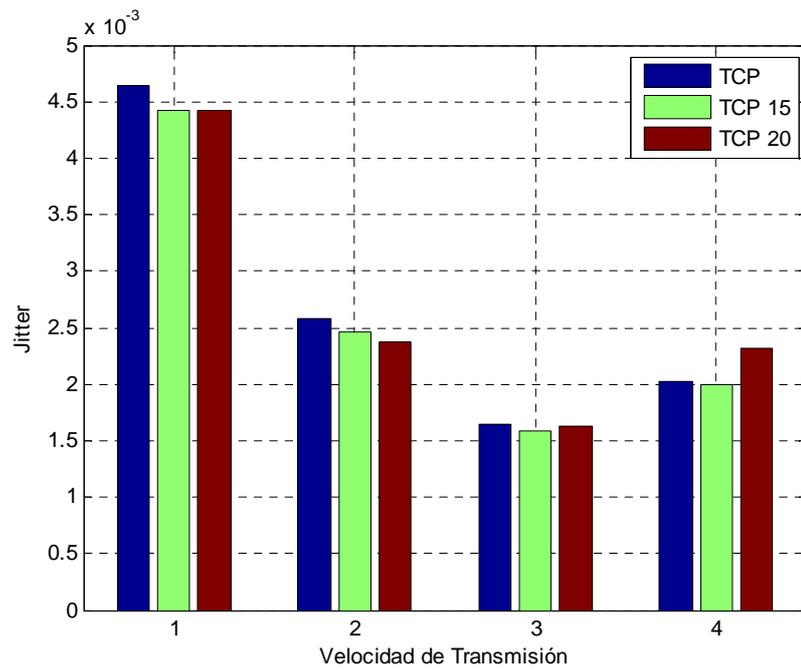


Figura 65. Tabulación de resultados del Jitter

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

En las Figuras 66, 67, 68 y 69, se observa como varía el *jitter* a través de los 5 minutos de inyección de tráfico con las diferentes tasas de transmisión.

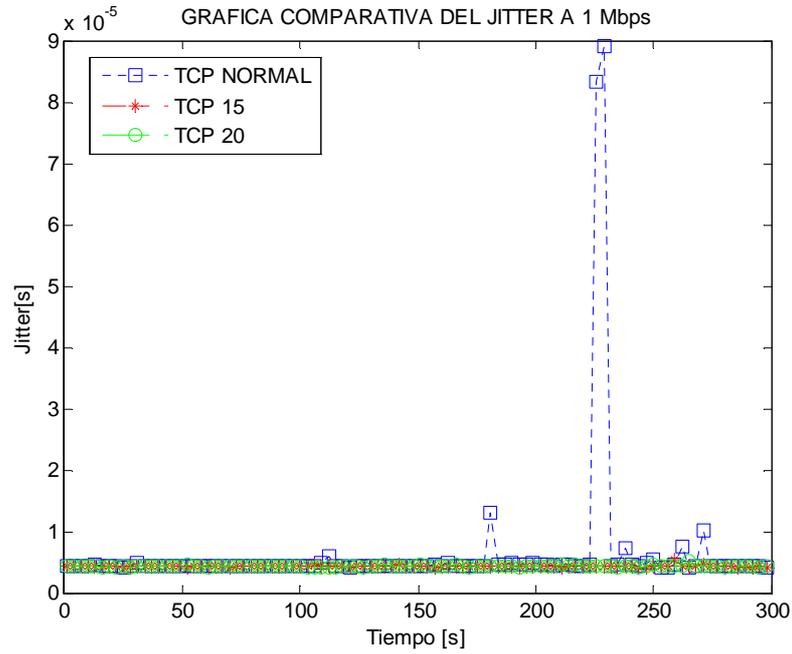


Figura 66. Jitter a 1 Mbps
(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

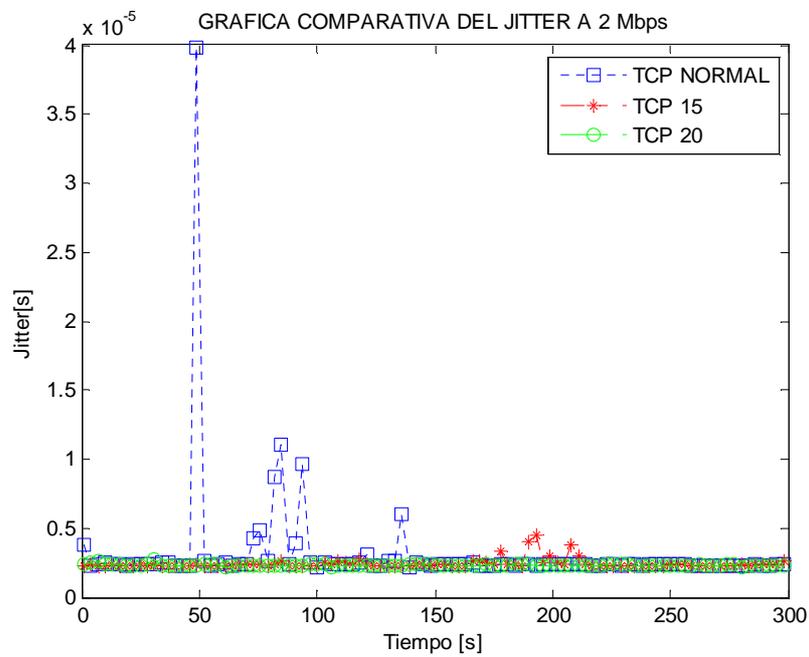


Figura 67. Jitter a 2 Mbps
(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

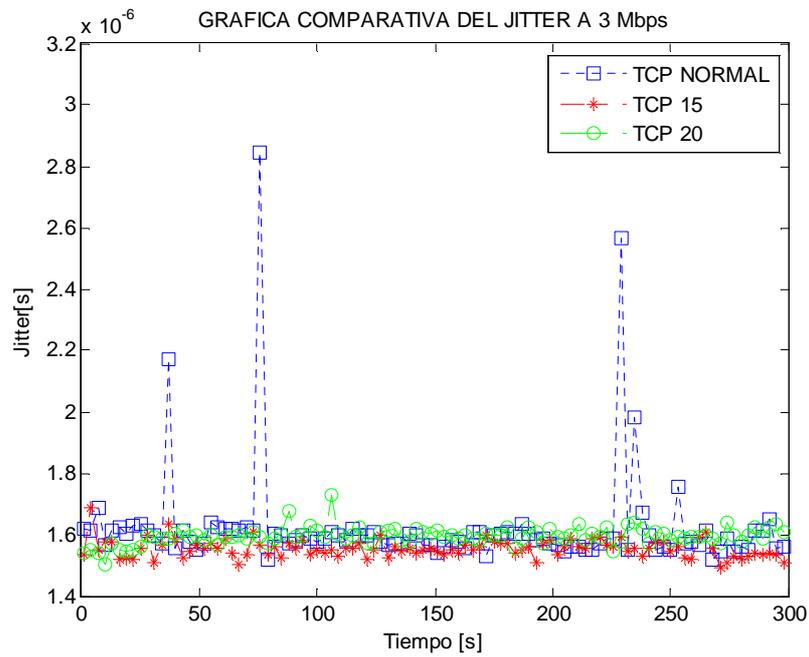


Figura 68. Jitter a 3 Mbps
(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

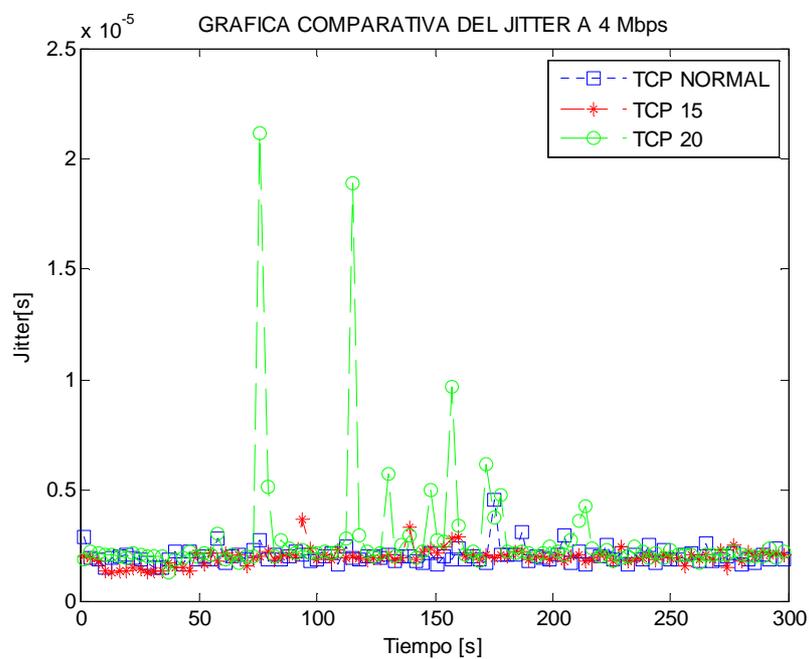


Figura 69. Jitter a 4 Mbps
(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

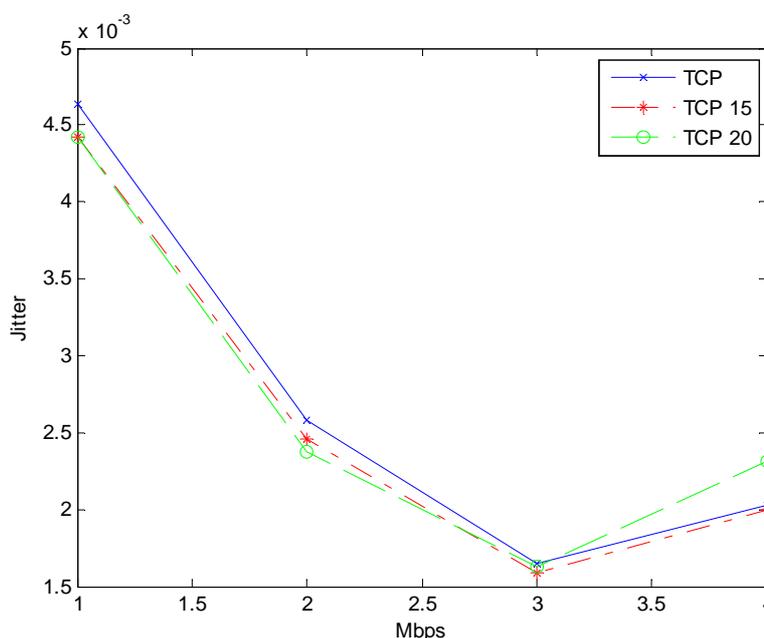


Figura 70. Comparativa de *Jitter* a 1, 2 ,3 y 4 Mbps en TCP normal y modificado

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

Como se puede apreciar en la Figura 70, el protocolo TCP modificado con una ventana de 15 se tiene una mejora en las 4 pruebas. Mientras que el TCP modificado con ventana de 20 tiene una mejora hasta los 3 Mbps, para mayores tasas de transmisión el protocolo fue decayendo el rendimiento del enlace y presenta mayores variaciones en el *jitter*. La mejora porcentual con respecto al *jitter* se lo puede ver en la Tabla 29.

Tabla 29. Mejora porcentual del TCP modificado en términos de *Jitter*

	1 Mbps	2 Mbps	3 Mbps	4 Mbps
TCP 15	4.74%	4.65%	3.22%	1.63%
TCP 20	4.74%	8.14%	0.85%	-14.05%

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

En la Tabla 29 se demuestra que el protocolo TCP modificado con una ventana de congestión de 15 mejora en todas las pruebas, mientras que el protocolo modificado con ventana de congestión de 20, empieza a empeorar a partir de los 4 Mbps. Adicionalmente, se puede observar, que a menor tasa de transmisión, mayor es la mejora del protocolo TCP modificado con ventana de congestión de 15.

Entendiendo los fundamentos del *jitter*, los retardos deberían disminuir a mayores tasas de transmisión, sin embargo, se puede observar que a partir de los 3 Mbps el *jitter* aumenta, esto puede ser debido a que la red empieza a saturarse y el protocolo TCP empieza a enviar duplicados de los paquetes perdidos.

- ***Delay:***

El retardo o *delay* de paquete es el tiempo tomado por un paquete en viajar desde un punto de acceso de servicio hacia un destino determinado, este parámetro incluye el tiempo de transporte en la red y el retardo de cola del mismo.

Este parámetro también es muy utilizado para determinar el desempeño de una red, el comando “*ping*” permite obtener este tiempo en un ambiente real. La sincronización de los relojes de los portátiles es imprescindible para poder realizar medidas de latencia en ambos sentidos de la comunicación. Debido a una falta de sincronismo entre los equipos utilizados, se debió usar otros métodos para el calcular el *delay*.

La figura 71 presenta el *delay* de extremo a extremo en segundos para el TCP original y TCP modificado con las distintas variaciones de la ventana de congestión. El retardo existente en la red fue obtenido después de realizar las pruebas con el

inyector D-ITG durante un tiempo de 300 segundos. La inyección del tráfico corresponde al flujo de paquetes que se envían desde Santa Cruz a San Cristóbal, el flujo agregado entregó como resultado un retardo promedio de 0.093276 [ms]. Se puede concluir que el mejor rendimiento se lo obtiene con el protocolo TCP modificado con ventana de congestión de 15.

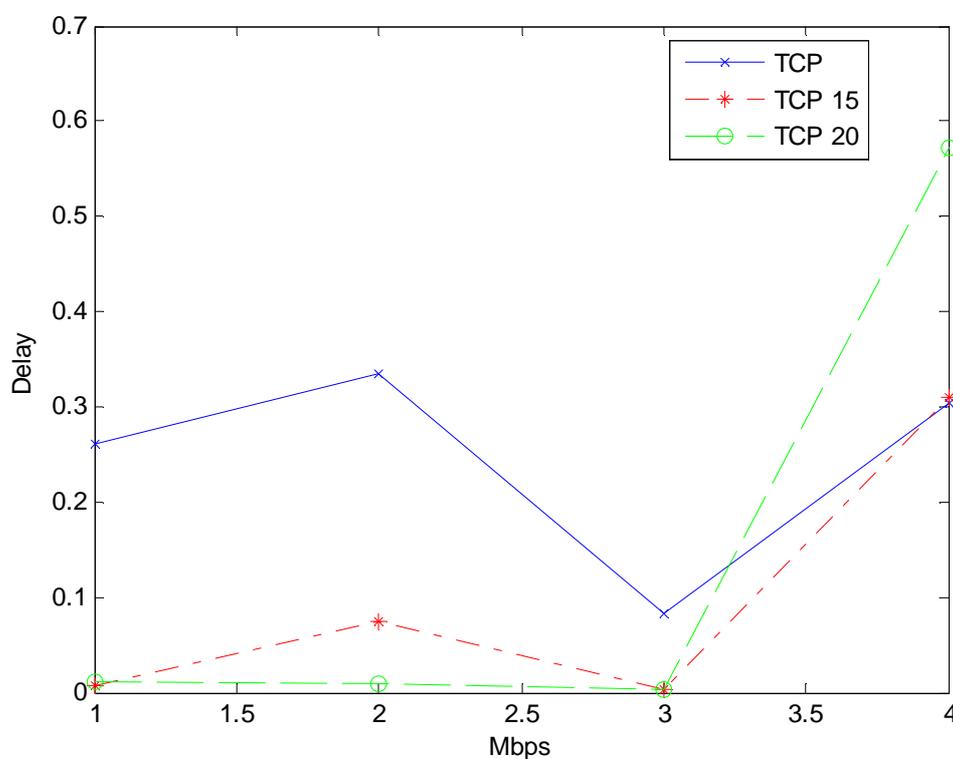


Figura 71. Comparativa del *delay* a diferentes tasas de transmisión para cada TCP.

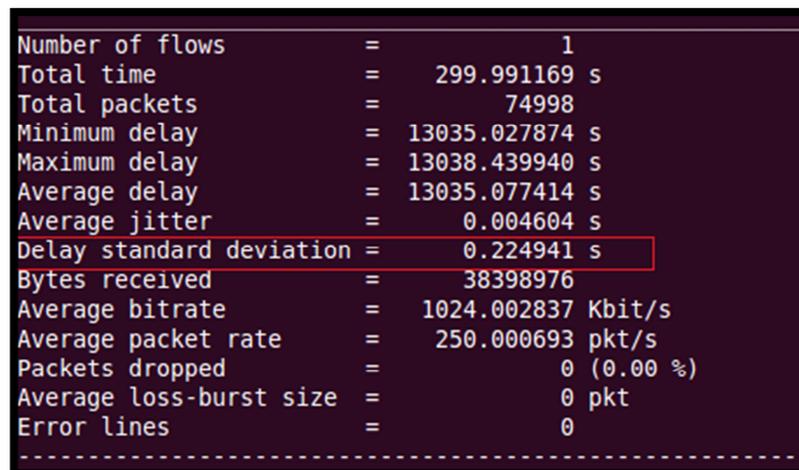
(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

Para obtener la gráfica y la medida del retardo, se utiliza un histograma para observar la distribución de probabilidad asociada a una variable aleatoria. En este caso, los 3 vectores obtenidos de los datos de TCP original, TCP 15 y TCP 20 para

las 4 velocidades de transmisión, estos retardos son obtenidos mediante la herramienta de inyección de tráfico D-ITG.

La desviación estándar es un promedio de las desviaciones individuales de un conjunto de datos que mide el grado de dispersión o variabilidad. En este caso mientras mayor es la desviación estándar, mayor es la dispersión entre tiempos de retardos.

La figura 72 corresponde a los valores obtenidos mediante el inyector de tráfico D-ITG con un TCP normal a una velocidad de transmisión de 1Mbps, lo cual nos indica como la desviación estándar del *delay* es 0.224 segundos.



Number of flows	=	1
Total time	=	299.991169 s
Total packets	=	74998
Minimum delay	=	13035.027874 s
Maximum delay	=	13038.439940 s
Average delay	=	13035.077414 s
Average jitter	=	0.004604 s
Delay standard deviation	=	0.224941 s
Bytes received	=	38398976
Average bitrate	=	1024.002837 Kbit/s
Average packet rate	=	250.000693 pkt/s
Packets dropped	=	0 (0.00 %)
Average loss-burst size	=	0 pkt
Error lines	=	0

Figura 72. Delay calculado por D-ITG

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

La desviación estándar es de 0.26 segundos como se lo muestra en la figura 72. El valor calculado en D-ITG fue de 0.22 segundos. En la figura 73 se muestra el histograma de la distribución de probabilidad de color morado, generando la curva en

color rojo que es la función de densidad de probabilidad. Una función de densidad de probabilidad caracteriza el comportamiento probable de un vector de datos.

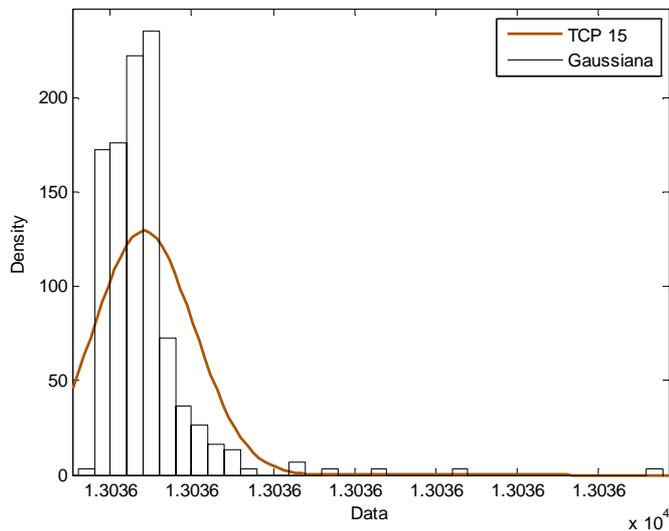


Figura 73. Histograma Delay a 3 Mbps.

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

Parameter	Estimate	Std. Err.
mu	13035.1	0.0150658
sigma	0.260947	0.0106798

Figura 74. Desviación estándar calculada en MatLab a 1 Mbps.

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

De esta manera, se calcula el retardo mediante MatLab, teniendo como resultado la tabla 30 para las 3 versiones del protocolo TCP a las 4 tasas de transmisión:

Tabla 30. Tabulación del Delay calculado con D-ITG y MatLab

Versión	1 Mbps	2 Mbps	3 Mbps	4 Mbps
TCP original D-ITG	0.224941	0.250504	0.082942	0.381077
TCP original MatLab	0.260947	0.334969	0.082168	0.304593
TCP Ventana de 15 D-ITG	0.014377	0.082433	0.007451	0.381219
TCP Ventana de 15 MatLab	0.007398	0.0748808	0.003413	0.310491
TCP Ventana de 20 D-ITG	0.016808	0.012506	0.006011	0.554816
TCP Ventana de 20 MatLab	0.011481	0.008992	0.003075	0.571323

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

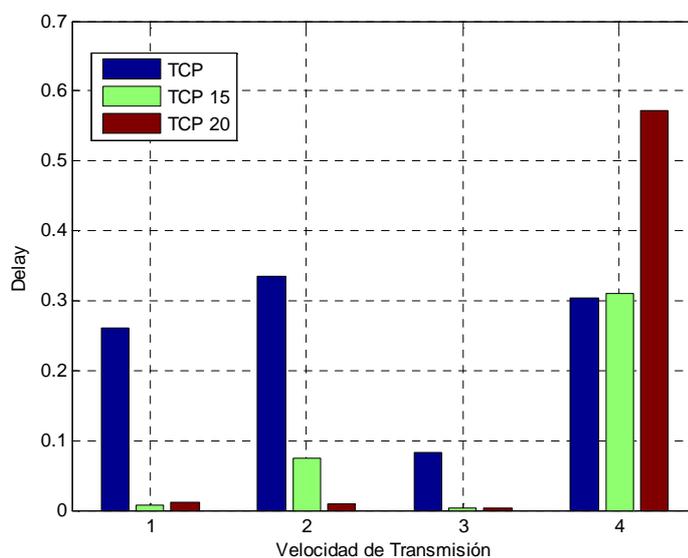


Figura 75. Tabulación de resultados del Delay

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

Tabla 31. Error porcentual calculado

Versión	Error % a 1 Mbps	Error % a 2 Mbps	Error % a 3 Mbps	Error % a 4 Mbps
TCP original	13.79	25.21	0.94	25.11
TCP Ventana de 15	94.33	10.08	118.31	22.77
TCP Ventana de 20 D-ITG	46.39	39.07	95.47	2.88

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

La tabla 30 y la figura 75 muestran la evolución de la latencia frente a las distintas velocidades de transmisión, durante una transmisión de 5 minutos. La inyección del tráfico corresponde al flujo de paquetes que se envían desde el emisor al receptor. El máximo retardo se lo alcanzó con el protocolo TCP modificado con ventana de congestión de 20 a una tasa de transmisión de 4 Mbps.

En la gráfica 75 nos indica que el protocolo TCP modificado con la ventana de congestión de 15 y de 20 mejora en las 3 velocidades transmitidas (1Mbps, 2 Mbps, 3 Mbps), comparando con el TCP normal, no obstante a 4 Mbps, el TCP modificado con ventana de 20 se dispara el delay y decae su rendimiento totalmente, aquí se observa que el protocolo con ventana de 15 tiene una mejora constante a las 3 velocidades, y a mayores tasas de transmisión de 4 Mbps los 3 algoritmos aumentan su retardo. La mejora porcentual respecto al retardo se lo puede ver en la tabla 32.

Tabla 32. Mejora Porcentual del Delay

Protocolo	1 Mbps	2 Mbps	3 Mbps	4 Mbps
TCP 15	97.16 %	77.65 %	95.85 %	-1.94 %
TCP 20	95.60 %	97.32 %	96.26 %	-87.57 %

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

Después de un análisis de cada uno de los parámetros considerados Bitrate, delay y jitter, se puede concluir que el TCP propuesto por (Olmedo, 2008) con una ventana de congestión de 15 mejora significativamente a velocidades de 1, 2 y 3 Mbps, pero la latencia a partir de 4 Mbps aumenta en un valor superior al obtenido en un TCP normal. Esto es debido que al alcanzar niveles de saturación de la red, en este caso de 4 Mbps, el protocolo modificado con ventana de 15 confunde las pérdidas

ocasionadas por congestión, haciendo que tarde más tiempo en empezar los mecanismos de control de flujo. De igual manera con la ventana de congestión de 20 mejora hasta 3 Mbps, sin embargo, a partir de 4 Mbps, se observa que el desempeño de este protocolo es menor en comparación con el de 15 y con el TCP original.

5.4 Propuesta para mejorar el rendimiento del protocolo TCP

Por naturaleza propia el protocolo TCP no tiene ningún inconveniente en retransmitir los paquetes perdidos sin detectar el motivo por el cual se perdió dicho paquete. A diferencia de esto, el protocolo TCP modificado utilizado busca diferenciar las pérdidas de los segmentos y plantear una reacción adecuada según el tipo de pérdidas con el fin de tener un mejor rendimiento. Lamentablemente, en concordancia con los resultados obtenidos, se concluye que no existe una mejora significativa en términos del *throughput*.

Mediante el análisis del desempeño del protocolo TCP modificado, se pudo observar que el *throughput* no tuvo un rendimiento superior significativo al TCP normal. Éste comportamiento es aceptable y predecible, ya que, a pesar de la modificación realizada a TCP en la capa de transporte, no se ha realizado ningún otro cambio para mejorar el desempeño en las capas inferiores. En tal virtud, se determina la necesidad de explorar más a fondo la arquitectura TCP-IP para poder obtener un mejor rendimiento del *throughput*.

Se hace necesario mejorar los mecanismos de detección del error, mediante una comunicación *cross-layer* optimizada. El protocolo TCP tiene que ser capaz de

reaccionar de acuerdo a las condiciones físicas de la red o del entorno en el que se desenvuelve. El objetivo es encontrar una nueva arquitectura idónea que pueda solucionar los problemas de comunicación entre capas, sin destruir la arquitectura actual que brinda muchas ventajas como la modularidad y la robustez (Choi, Perry, & Nettles, 2008).

La arquitectura actual fue diseñada para redes cableadas, y su funcionamiento es eficiente, sin embargo, con el advenimiento de las redes inalámbricas se ha encontrado que las capas superiores de la arquitectura TCP/IP hacen suposiciones incorrectas acerca del estado de las capas inferiores. Los enlaces inalámbricos están sujetos a una mayor probabilidad de error de transmisión que los enlaces cableados, por el medio de transmisión que ocupa ya que no se sabe con certeza si se sufre de interferencias producidas por otros equipos en el entorno radioeléctrico, y esto hace que menor sea el rendimiento de la red, interpretándose como congestión y así disminuyendo la velocidad con la que se envían los datos. El problema se complica aún más por el gran tiempo de propagación en este tipo de sistemas. Como resultado de la incapacidad de TCP de reconocer con certeza si el error es causado por congestión de la red o por diferentes razones ocasionadas en el medio o canal de comunicación, TCP dispara el procedimiento de control de congestión reduciendo bruscamente la ventana de congestión, produciendo que las aplicaciones tengan altos valores de latencia.

La manera que TCP detecta un segmento perdido es mediante la expiración del temporizador RTO (TO - *time out*) o mediante la recepción de 3 ACK's duplicados (TD – triple duplicado). Los mecanismos que TCP utiliza para manejar cualquiera de

las pérdidas por RTO son de reducir la ventana de congestión a 0 y el *ssthresh* a la mitad; mientras que si las pérdidas son detectadas por TD, la ventana de congestión y el *ssthresh* se reducen a la mitad.

Una alternativa para resolver estos inconvenientes se basa en un modelo mediante el cual se pueda controlar la velocidad de transmisión basado en la información de la calidad del enlace. La velocidad a la cual los datos son enviados debería depender del estado del canal entre el emisor y el receptor en cada momento. El diseño más óptimo debería transmitir datos a la máxima tasa posible, tomando en cuenta que las condiciones del canal pueden variar de paquete a paquete. Actualmente, en el estándar IEEE 802.11 trabajando en modo DCF, se produce un intercambio de mensajes de control entre el emisor y el receptor antes de la transmisión de datos con el fin de coordinar el acceso de canal, (IEEE Standard, 1997). Con dicho procedimiento, la capa física conoce el estado del canal, sin embargo, esta información no es compartida con las capas superiores, lo cual hace que el protocolo TCP no sepa las condiciones de la red o del enlace.

Algunos de los trabajos realizados para mejorar el rendimiento del *throughput* de TCP se han enfocado en tratar de diferenciar las pérdidas de paquetes debido a la congestión y debido a los errores de transmisión. La versión TCP Jersey descrita en (Xu, Tian, & Ansari, 2004) se ha desarrollado específicamente para detectar congestiones de TCP en una red inalámbrica y reaccionar en consecuencia de ello. De acuerdo a (Capone, Fratta, & Martignon, 2004), el *throughput* máximo en una conexión TCP, se logra cuando la ventana de congestión de TCP es igual al

*Bandwidth Delay Product*² del canal. Lastimosamente las soluciones propuestas son generalizadas para cualquier red inalámbrica y no se toman en cuenta las especificidades de la capa MAC ni la interacción con el medio. Es decir, estos modelamientos no están optimizados para redes inalámbricas IEEE 802.11.

En (Dalal & Dasgupta, 2010) se propone un algoritmo de diferenciación, capaz de distinguir los motivos de la pérdida de paquetes. Cuando TCP recibe 3 ACK's duplicados, el algoritmo debe diferenciar si la pérdida del paquete es por congestión (realiza el procedimiento normal de control de congestión); o a su vez la pérdida de paquetes se debe a interferencias físicas (no se realiza el control de congestión). Esta propuesta implementa un contador a nivel de capa MAC para los intentos de retransmisión de cada trama. Cuando el contador llega a un límite de 3 reintentos, una bandera de advertencia se enciende indicando que la pérdida del paquete es debido a la interfaz del medio, mas no por la congestión de la red. A nivel de capa de transporte, cuando TCP recibe 3 ACK's duplicados, revisa si alguna bandera del contador está encendida antes de reducir el tamaño de la ventana de congestión. Al tener una bandera encendida, TCP no reduce el tamaño de la ventana de congestión, sino que intenta retransmitirlo una vez más. Con este contador, se puede diferenciar el tipo de pérdidas que se tiene y aprovechar de mejor manera el ancho de banda disponible.

El protocolo TCP modificado propuesto en (Olmedo, 2008) e implementado en (Pilo-País, 2011) permite una extensión de la ventana de congestión con un valor de 15 y 20 cuando reciben ACK's negativos. Esto permite un aprovechamiento parcial

² **BANDWIDHT DELAY PRODUCT** La cantidad de bits que se pueden enviar durante un RTT.

antes de que la ventana de congestión se reduzca. Para poder tener un mejor aprovechamiento del ancho de banda disponible, se ve que es necesario optimizar la comunicación entre capas ya que según lo descrito en (Xie, Pazzi, & Boukerche, 2012), el RTT de la capa de transporte depende de los valores determinados por la capa de enlace, afectando por lo tanto el rendimiento del protocolo TCP.

El problema que surge en el uso de TCP sobre redes inalámbricas proviene del hecho de que los enlaces inalámbricos tienen características diferentes con respecto a los cableados, en términos de menor fiabilidad y el comportamiento variante en el tiempo, problemas de desvanecimiento, movilidad, ancho de banda limitado y grandes RTT. En los enlaces inalámbricos de valor de RTT es muy alto y variado, debido a la variación de las condiciones de la red, condiciones del enlace y del tiempo de propagación (en función de la distancia del enlace). Como resultado de ello, durante una conexión TCP en enlaces inalámbricos toma más tiempo para salir de la fase del *Slow Start*, restringiendo a TCP de utilizar el máximo de ancho de banda disponible, con la consecuente degradación del *throughput*.

Una de las posibles causas de no tener un incremento en el desempeño del *throughput* puede ser debido a que la distancia del enlace hace que el RTO expire antes de poder recibir la respuesta del ACK de TCP, como se indica en la Figura 76.

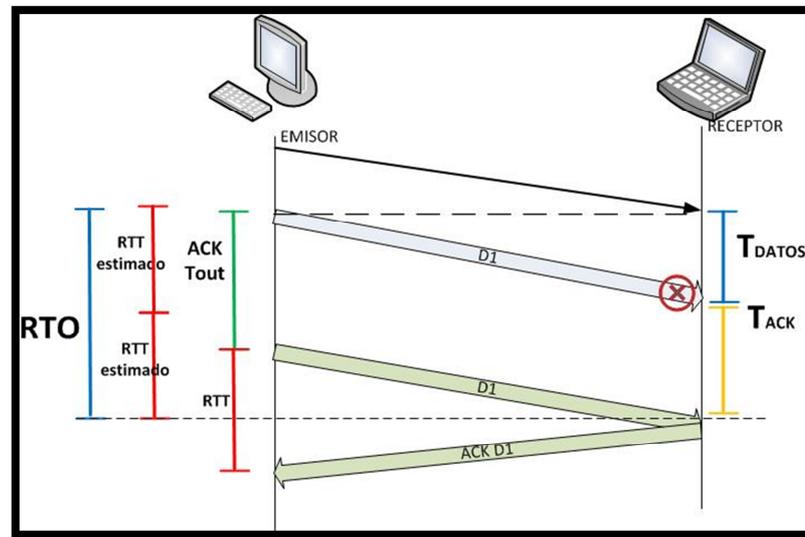


Figura 76. Diagrama de tiempos.

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

Basados en este concepto, es necesario poder estimar un valor adecuado para el RTO acorde a las necesidades propias de nuestro sistema. Es decir, este RTO debe depender de la distancia y de las condiciones actuales del enlace inalámbrico existente. Con la ayuda del modelamiento realizado por parte de (Xie, Pazzi, & Boukerche, 2012) es factible estimar un valor de RTT para las condiciones de nuestro sistema, y con este valor, se puede deducir el valor mínimo del RTO apropiado para nuestras condiciones.

5.4.1 Modelamiento del RTT

Basados en el modelamiento del protocolo TCP Reno realizado en (Padhye, Firoiu, Towsley, & Kurose), se obtienen las ecuaciones 5.1 y 5.2 para analizar el *throughput*. Para realizar el estudio del modelamiento del protocolo TCP se parte de las siguientes condiciones iniciales:

- La red está en condiciones de saturación.
- Se asume que RTT es independiente al tamaño de la ventana de congestión, que sólo se ve afectada por las condiciones de la red.
- Si en la capa de enlace existe un *Clear To Send* (CTS), se supone que los 2 equipos involucrados en la transmisión se adueñan del canal y no existe un tercer equipo que compita por el mismo canal hasta que se termine la transmisión.

Por lo tanto la media del throughput se podrá calcular como se muestra en la ecuación (5.1):

$$E[B] \approx \frac{1}{E[RTT] \sqrt{\frac{2bp}{3}} + T_0 \min\left(1.3 \sqrt{\frac{3bp}{8}}\right) p(1 + 32p^2)} \quad (5.1)$$

$$B(RTT, p) = \min\left(\frac{W_{max}}{E[RTT]}, E[B]\right) \quad (5.2)$$

Dónde:

- $E[B]$: Media del *throughput* de TCP.
- $E[RTT]$: Media del RTT.
- b : Número de segmentos con cada ACK recibido.
- T_0 : Tiempo de espera inicial.
- p : Probabilidad de pérdida del segmento.
- W_{max} : Tamaño máximo de la ventana de congestión en este caso en IEEE 802.11n es 1023.
- $B(RTT, p)$: *Throughput* de TCP en función del RTT y la probabilidad de pérdida de segmentos.

Con las condiciones descritas anteriormente, (Xie, Pazzi, & Boukerche, 2012) se realiza un análisis matemático a partir de las ecuaciones 5.1 y 5.2. En dicho trabajo se determina que las pérdidas de paquetes se producen por la contención en el canal de transmisión, mas no por la congestión de la red.

A partir de las ecuaciones 5.3, 5.4 y 5.5 se estima el RTT mediante la descomposición del tiempo para transmitir los datos y del tiempo para transmitir el acuse de recibo (ACK).

$$E[RTT] = E[T_{data}] + E[T_{ACK}] \quad (5.3)$$

$$E[T_{data}] = E[t_q] + E[t_{data}] + E[t_{LLD}] \quad (5.4)$$

$$E[T_{ACK}] = E[t_q] + E[t_{ACK}] + E[t_{LLA}] \quad (5.5)$$

Dónde:

$E[T_{data}]$: Media de tiempo para transmitir un segmento de datos.

$E[T_{ACK}]$: Media de tiempo para transmitir el ACK.

$E[t_q]$: Media del tiempo en la cola.

$E[t_{data}]$: Tiempo para transmitir el segmento de datos.

$E[t_{ACK}]$: Tiempo de transmisión de la confirmación de recepción.

$E[t_{LLD}]$: retardo en la capa de enlace es ($LLD = Link Layer Delay$)

$E[t_{LLA}]$: ($LLA = Link Layer Delay of ACK$)

En las ecuaciones 5.4 y 5.5 se descompone el $E[T_{data}]$ y el $E[T_{ACK}]$ respectivamente. La media del tiempo en la cola $E[t_q]$, es aproximadamente el mismo en los 2 casos y no se lo toma en cuenta; los valores de $E[t_{data}]$ y $E[t_{ACK}]$ están relacionados con el tiempo de propagación.

Finalmente, en las ecuaciones 5.6 y 5.7 se obtiene que el $E[t_{data}]$ es igual a la longitud de los segmentos de datos sobre la tasa de transmisión; $E[t_{ACK}]$ es igual a la longitud del segmento de ACK sobre ancho de banda actual r .

$$E[t_{data}] = \frac{L_{data}}{r} N \quad (5.6)$$

$$E[t_{ACK}] = \frac{L_{ACK}}{r} \quad (5.7)$$

Dónde:

L_{data} : longitud de los segmentos de datos

r : Tasa de transmisión.

N : número de tramas de cada segmento TCP después de la fragmentación.

El $E[t_{LLD}]$ es causado por los mecanismos de contención. El transmisor envía un RTS al receptor y espera un mensaje CTS para verificar que el canal esté disponible. Si no recibe un CTS antes de que expire el $E[t_{OLL}]$ (*Time Out Link Layer*³), el transmisor ingresará en la fase de *backoff*. Por lo tanto, $E[t_{LLD}]$ queda definido en la ecuación 5.8. En las ecuaciones 5.9 y 5.10 se especifican los términos de la ecuación 5.8.

³ *Time Out Link Layer*: es la máxima estimación del retardo por propagación en la red, interviene la distancia

$$E[t_{LLD}] = \left(\frac{L_{RTS}}{r} + \frac{L_{RTS}}{r} + E[delay_{LL}](E[N_{RTS}] - 1) \right. \\ \left. + E[delay_{LL}](E[N_{data}] - 1) + \frac{L_{ACK_{LL}}}{r} \right) N \quad (5.8)$$

$$E[delay_{LL}] = E[BF] slotTime + E[TO_{LL}] \quad (5.9)$$

$$E[TO_{LL}] = \frac{L_{RTS}}{r} + \frac{L_{RTS}}{r} + 2 PDelay_{max} \quad (5.10)$$

Dónde:

$E[BF]$: Media de tiempo de *backoff*.

$E[N_{rts}]$: Media de veces necesarias para transmitir un RTS cuando se necesita enviar una trama.

$E[N_{data}]$: Media de veces necesarias para transmitir una trama de datos.

$E[TO_{LL}]$: Estimación máxima del retardo debido a la propagación en la red.

En el retraso para el enlace de confirmación $E[t_{LLA}]$ es similar a la $E[t_{LLD}]$, sin multiplicar por N (N viene asociado a la fragmentación del segmento TCP). En la ecuación 5.11 F_{RTS} indica la probabilidad de falla de una transmisión de un RTS, y el N_{RTSMAX} es el máximo número de reintentos de transmitir un RTS.

$$E[N_{RTS}] = \frac{1 - F_{rts}^{(N_{RTSMAX}+1)}}{1 - F_{RTS}} \quad (5.11)$$

Para la transmisión de una trama de datos, el análisis es el mismo que para la transmisión de una trama *RTS*. Por lo tanto se obtiene la ecuación 5.12.

$$E[N_{data}] = \frac{1 - F_e^{(N_{rtsmax}+1)}}{1 - F_e} \quad (5.12)$$

Dónde:

F_e : Probabilidad de falla de la transmisión de una trama de datos.

$N_{datamax}$: Número máximo de retransmisiones de una trama de datos.

Hay dos razones para la pérdida de paquetes *RTS*, que son el *Bit Error Rate* (BER⁴) y la colisión. La probabilidad de fallo causado por la BER se denota como F_{BER} , mientras que la probabilidad de fallo causado por la colisión es F_c y se determina por la media del *backoff* $E[BF]$ y el número de estaciones ($N_{station}$) conectadas al mismo terminal. En un enlace punto a punto, se comprueba que la probabilidad de fallo es causado estrictamente por el BER y por exceder el tiempo de retransmisión de un *RTS*, según se puede observar en las ecuaciones 5.13, 5.14 y 5.15.

$$F_{rts} = F_{BER} + F_c \quad (5.13)$$

$$\begin{cases} F_{BER} = 1 - (1 - BER)^{L_{RTS}} \\ F_c = 1 - \left(\frac{1}{E[BF]}\right)^{N_{station}-1} \end{cases} \quad (5.14)$$

$$F_e = 1 - (1 - BER)^{L_{DATA}} + F_{rts}^{N_{RTSmax}+1} \quad (5.15)$$

Dónde:

L_{RTS} : Tamaño de una trama *RTS*.

⁴ **BER**: tasa de error de bit

L_{DATA} : Tamaño de una trama de datos.

Para que un segmento TCP sea considerado como una transmisión exitosa es necesario que todas las tramas de los segmentos sean recibidas y confirmadas como exitosas. Por lo tanto, la probabilidad de falla de un segmento TCP se la considera en la ecuación 5.16:

$$p = 1 - (1 - F_e^{N_{datamax}})^N \quad (5.16)$$

Con el modelamiento descrito, se concluye que el RTT está determinado principalmente por los parámetros de la capa de enlace. Uno de los factores más importantes es la media del *backoff*, que se determina según el tamaño de la ventana de contención. La contención y el retraso en la capa de enlace afectan significativamente al RTT y por ende al desempeño del protocolo TCP.

5.4.2 Cálculo del RTT

El modelamiento realizado en (Xie, Pazzi, & Boukerche, 2012) utiliza un *four-way-hand-shaking*, sin embargo, en el proyecto realizado, al tener un enlace punto a punto, se plantea optimizar recursos de la red omitiendo este procedimiento. Por lo tanto, utilizando los valores del estándar IEEE 802.11n detallados en el capítulo 2, y con la ayuda del modelamiento matemático antes expuesto, se procedió a realizar los cálculos respectivos de la siguiente manera:

El tiempo de *backoff* se define según la ecuación 5.17, con los valores de:

Tabla 33. Parámetros de la red

Condición de la red:	Saturación	L_{data} :	1500 x 8
r :	1, 2 ,3 ,4 Mbps	L_{ACK} :	34 X 8
BER:	10^{-6}	SIFS:	16 [μs]
Distancia:	92 km	PIFS:	25 [μs]
Ancho de banda:	20 MHz	DIFS:	34 [μs]
N_{RTSmax} :	5	CW min:	15
		CW max:	1023

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

$$E[BF] = \frac{CW_{min} Slot\ time}{2} = \frac{15 \times 9}{2} = 67.5 [\mu s] \quad (5.17)$$

Para el cálculo del tiempo de propagación (TO_{LL}) se utiliza la ecuación 5.10, pero al no utilizar *handshaking*, la ecuación se reduce a:

$$E[TO_{LL}] = 2 PDelay_{max} = 2 \left(\frac{92000[m]}{3 \times 10^8[m/s]} \right) = 614 [\mu s] \quad (5.18)$$

Por lo tanto, la ecuación 5.9 queda definida de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} E[delay_{LL}] &= E[BF] slot\ time + E[TO_{LL}] = (67.5) (9) + 614 \\ &= 1221.5 [\mu s] \end{aligned} \quad (5.19)$$

La media de veces necesarias para transmitir una trama de datos y la probabilidad de falla de la transmisión de una trama de datos quedan definidos según las ecuaciones 5.12 y 5.15 respectivamente como se detalla a continuación:

$$F_e = 1 - (1 - BER)^{L_{data}} = 1 - (1 - 1 \times 10^{-6})^{8 \times 1500} = 0.0119 \quad (5.20)$$

$$E[N_{data}] = \frac{1 - F_e^{(N_{RTSmax}+1)}}{1 - F_e} = \frac{1 - 0.0119^{5+1}}{1 - 0.0119} = \mathbf{1.0121} \quad (5.21)$$

Por lo tanto, el retardo en la capa de enlace según la ecuación 5.8 para una tasa de transmisión de 1Mbps queda definida como:

$$E[t_{LLD}] = \left\{ E[delay_{LL}] (E[N_{data}] - 1) + \frac{L_{ACK_{LL}}}{r} \right\} N \quad (5.22)$$

$$\begin{aligned} E[t_{LLD}] &= \left\{ (1221.5 [\mu s]) (1.0121 - 1) + \frac{34 \times 8}{1 \times 10^6 [Mbps]} \right\} N \quad (5.23) \\ &= \mathbf{2.8678 \times 10^{-4} N [s]} \end{aligned}$$

El tiempo para transmitir el segmento de datos $E[t_{data}]$ para una tasa de transmisión de 1Mbps, según se indica en la ecuación 5.6, queda definido como:

$$E[t_{data}] = \frac{L_{data}}{r} N = \frac{1500 \times 8}{1 \times 10^6} N = \mathbf{0.012N [s]} \quad (5.24)$$

Por lo tanto, el tiempo necesario para transmitir un segmento de datos como se especifica en la ecuación 5.4, teniendo como resultado:

$$E[T_{data}] = E[t_{data}] + E[t_{LLD}] = \mathbf{0.0123 N[s]} \quad (5.25)$$

Para el cálculo del tiempo necesario para transmitir el acuse de recibo (ACK) según lo especificado en la ecuación 5.7 y 5.5 para tasas de transmisión de 1 Mbps respectivamente queda definido como:

$$E[t_{ACK}] = \frac{L_{ACK}}{r} = \frac{34 \times 8}{1 \times 10^6} = \mathbf{2.72 \times 10^{-4} [s]} \quad (5.26)$$

$$\begin{aligned} E[t_{LLA}] &= \left\{ (1221.5 [\mu s]) (1 - 1.0121) + \frac{34 \times 8}{1 [Mbps]} \right\} \\ &= \mathbf{2.8678 \times 10^{-4} [s]} \end{aligned} \quad (5.27)$$

$$E[T_{ACK}] = E[t_q] + E[t_{ACK}] + E[t_{LLA}] = \mathbf{5.5878 \times 10^{-4} [s]} \quad (5.28)$$

Finalmente, la media del RTT queda definida según la fórmula 5.3, en donde:

$$E[RTT] = E[T_{data}] + E[T_{ACK}] \quad (5.29)$$

$$E[RTT] = \mathbf{0.0123N + 5.5878 \times 10^{-4} [s]} \quad (5.30)$$

Para poder calcular el RTO adecuado, TCP utiliza un mecanismo de retransmisión adaptativa, el cual en su algoritmo original especifica al RTO en función del RTT estimado de la siguiente manera

$$RTO = 2 RTT_{estimado} = 2 (0.0123N + 5.5878 \times 10^{-4}) [s] \quad (5.31)$$

El cálculo se lo realiza de igual manera para las diferentes tasas de transmisión, es decir, el RTT estimado y RTO para las diferentes tasas de transmisión se lo muestra en la tabla 34:

Tabla 34. Cálculo del RTT estimado para las diferentes tasas de transmisión

Tasa de Transmisión	RTT Calculado	RTO= 2(RTT)
1 Mbps	$0.0123N + 5.587 \times 10^{-4} [s]$	$2(0.0123N + 5.587 \times 10^{-4}) [s]$
2 Mbps	$0.0062N + 2.867 \times 10^{-4} [s]$	$2(0.0062N + 2.867 \times 10^{-4}) [s]$
3 Mbps	$0.0041N + 1.961 \times 10^{-4} [s]$	$2(0.0041N + 1.961 \times 10^{-4}) [s]$
4 Mbps	$0.0031N + 1.507 \times 10^{-4} [s]$	$2(0.0031N + 1.507 \times 10^{-4}) [s]$

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

Como se puede observar en las ecuaciones anteriores se obtiene una expresión matemática para calcular el RTT y RTO de acuerdo a las condiciones del sistema y de la distancia del enlace. Se pudo determinar que el tiempo de *backoff* afecta el cálculo del RTT impactando negativamente en el rendimiento del protocolo TCP. El cálculo del RTO se lo realizó con la finalidad de determinar el tiempo óptimo para que las confirmaciones de recepción de segmentos alcancen a llegar al transmisor sin que expire el tiempo del temporizador de ACK.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

Para la implementación de una red de larga distancia en la Región Insular con la modificación del algoritmo del protocolo de control de transmisión (TCP) fue necesario un estudio detallado del funcionamiento tanto de la tecnología WiLD, como características técnicas del equipamiento para el sistema de comunicación inalámbrica, lo que permitió determinar que los equipos utilizados fueron los propietarios Motorola PTP 58600 debido a sus características propias de potencia de transmisión, umbral de recepción, temperatura y humedad soportada, además son equipos robustos los cuales permiten realizar ciertas modificaciones en los parámetros de configuración para obtener un enlace de larga distancia, y así poder evaluar los cambios realizados a nivel de la capa de transporte del nuevo algoritmo.

En la planificación de la red se utilizó el software SIRENET para el diseño de la red y el simulador de red Motorola LINKPlanner para obtener características más detalladas del enlace, en el cual determinó que existe una buena señal en el radioenlace

ya que la que la potencia de recepción en los enlaces realizados es de -71 dBm, y la sensibilidad de los equipos Motorola esta entre el rango de -98 dBm a -58 dBm.

Al analizar los resultados de calidad de servicio se determinó cual es la máxima cantidad de datos efectivos sin errores que se puede alcanzar en la red. Mediante el cálculo del throughput se pudo observar que tan efectivo es el canal en el que se está transmitiendo. La tasa del throughput en una red inalámbrica esta entre el 30% al 60%, con los parámetros del enlace y con la utilización de los equipos Motorola PTP 58600 se obtuvo un rendimiento del 41.3 %, este rendimiento es aceptable ya que se verá reflejado en la cobertura, calidad de servicio y disponibilidad de acceso, con este valor se está garantizando una tasa de transferencia confiable.

Se realizaron pruebas de inyección de tráfico mediante el software D-ITG con la finalidad de poder analizar el desempeño de la red mediante parámetros de calidad de servicio como el *Bitrate*, *jitter* y *delay*. Los resultados son:

- En cuanto al *Bitrate* no se obtuvo una mejora en ninguno de los algoritmos modificados. Evaluando la red en todas las velocidades de transmisión el TCP original es ligeramente superior al protocolo TCP modificado con ventana de congestión de 15; en el protocolo TCP modificado con ventana de 20 se observó que la tasa de transmisión decae a los 3 Mbps.
- El *jitter* tuvo una mejora promedio del 3.56 % en el TCP con ventana de congestión de 15 con respecto al TCP normal, sin embargo el TCP con ventana de 20 no tiene una mejora, entendiendo los fundamentos del *jitter*, los retardos deberían disminuir a mayores tasas de transmisión, sin embargo, se puede observar que a

partir de los 3 Mbps el *jitter* aumenta, esto puede ser debido a que la red empieza a saturarse y el protocolo TCP empieza a enviar duplicados de los paquetes perdidos.

- En cuanto al *delay* se puede concluir que el TCP con una ventana de congestión de tiene mejora en las velocidades de 1, 2 y 3 Mbps y se comprueba que la latencia a partir de 4 Mbps aumenta en un valor ligeramente superior al obtenido en un TCP normal. De igual manera con la ventana de congestión de 20 mejora hasta 3 Mbps, sin embargo, a partir de 4 Mbps, el valor del *delay* aumenta considerablemente.

El tráfico de datos con una ventana de congestión de 15 y evaluados en el los parámetros de calidad de *throughput* es similar al TCP normal, en términos de *jitter* se mejora con un promedio del 3.56% respecto del TCP normal y en *delay* es más óptimo que el TCP normal con una mejora promedio del 67.18%. El protocolo TCP **normal** no tiene ningún problema en retransmitir los paquetes perdidos, sin embargo, es necesario determinar el motivo por el cual se perdió dicho paquete. El protocolo TCP **modificado** busca diferenciar los tipos de pérdidas, y por ende, le permite reaccionar de acuerdo al tipo de pérdidas, sin embargo, en concordancia con los resultados obtenidos, se puede observar que no hay una mejora significativa en términos de los parámetros de calidad de servicio.

En el enlace inalámbrico Inter-Islas tiene un valor muy alto y variado de RTT, debido al cambio de condiciones de la red, condiciones del enlace y del tiempo de propagación en función de los 92 km de distancia que separan las islas, como resultado de ello durante la conexión TCP, toma más tiempo para salir de la fase del

Slow Start, restringiendo a TCP de utilizar el máximo de ancho de banda disponible, con la consecuente degradación del *throughput*.

El protocolo **TCP modificado** en (Olmedo, 2008) e implementado en (Pilo-País, 2011) permiten una extensión de la ventana de congestión con un valor de 15 y 20 cuando reciben ACK's negativos lo que permite un aprovechamiento parcial, antes que la ventana de congestión se reduzca.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se pudo observar que el *throughput* del protocolo TCP modificado no tuvo el rendimiento esperado. Sin embargo, este comportamiento es aceptable y predecible, ya que, a pesar de la modificación realizada a TCP en la capa de transporte, no se ha realizado ningún otro cambio para mejorar el desempeño en las capas inferiores. En tal virtud, se determina la necesidad de explorar más a fondo la arquitectura TCP-IP para poder obtener un mejor rendimiento del *throughput*.

La evaluación del desempeño del nuevo algoritmo del protocolo TCP para un enlace inalámbrico de larga distancia inter-islas en la Región Insular se lo ha ejecutado en base a un estudio del arte del protocolo TCP en sistemas inalámbricos, determinando las características técnicas del equipamiento para el sistema de comunicación utilizado, ejecutando una buena planificación de la red implementada en la Región Insular mediante la inyección de tráfico, obteniendo que el protocolo TCP modificado con ventana de 15 tiene un rendimiento parecido con respecto al TCP normal; sin embargo para lograr obtener un mejor desempeño se exigió diseñar

un modelamiento matemático obteniendo el RTO óptimo para la transmisión a largas distancias (92 km) a una tasa de transferencia máxima de 4 Mbps debido a que el enlace inalámbrico no soporta mayores velocidades de transmisión; y se detalla en la siguiente tabla 35:

Tabla 35. RTT estimado para un enlace a 92 km

Tasa de Transmisión	RTT Calculado	RTO=2(RTT)
1 Mbps	$0.0123N + 5.587 \times 10^{-4} [s]$	$2(0.0123N + 5.587 \times 10^{-4})[s]$
2 Mbps	$0.0062N + 2.867 \times 10^{-4} [s]$	$2(0.0062N + 2.867 \times 10^{-4})[s]$
3 Mbps	$0.0041N + 1.961 \times 10^{-4} [s]$	$2(0.0041N + 1.961 \times 10^{-4})[s]$
4 Mbps	$0.0031N + 1.507 \times 10^{-4}[s]$	$2(0.0031N + 1.507 \times 10^{-4})[s]$

(Fuente: Elaborado por autores de la investigación)

6.2 Recomendaciones

Para realizar un enlace de larga distancia es recomendable verificar que no existan problemas de interferencia. La banda utilizada de 2.4 GHz presento muchas interferencias, por lo que se utilizó banda de los 5 GHz, con la que obtuvieron excelentes resultados, recomendando siempre tener línea de vista y al menos el 60% de la primera zona de Fresnel despejada para garantizar la calidad del enlace.

Para realizar los emplazamientos y alineaciones de los enlaces de larga distancia es necesario contar con equipamiento necesario tanto para seguridad de la instalación como para garantizar el correcto alineamiento de las antenas.

Es recomendable que la planificación de la red tenga un análisis técnico económico para la selección de los equipos a utilizarse y los lugares donde se realizarán los emplazamientos, y así obtener una perspectiva más real en cuanto a la elección de los lugares dónde se realizará el enlace.

Para realizar las pruebas de inyección de tráfico mediante el software D-ITG es necesario modificar el parámetro del tiempo de espera (*ACK Time out*) en el transmisor de acuerdo a la distancia del enlace, y sincronizar los relojes en el transmisor y receptor, con la finalidad de obtener los retardos sean valores reales y evitar así valores erróneos que conduzcan a una mala evaluación.

En enlaces de larga distancia es importante determinar el valor del TO, para que sea lo suficientemente grande para que no expire antes de recibir los 3 ACK's duplicados, para que el *throughput* no sea afectado tan bruscamente; sin embargo, es recomendable que este valor no debe ser tan elevado como para que TCP se vuelva muy lento para reaccionar ante la pérdida de un paquete.

Se hace necesario mejorar los mecanismos de detección del error, mediante una mejor comunicación a través de las capas y de los límites de cada una de ellas. Esto se lo puede lograr mediante un diseño entre capas adecuado (*Cross Layer*), el cual

sea capaz de reaccionar de acuerdo a las condiciones físicas de la red o del entorno en el que se desenvuelve, sin destruir la arquitectura actual que brinda muchas ventajas como la modularidad y la robustez.

A medida que se logra solucionar problemas específicos en el enlace, nuevos problemas surgen y se deben crear nuevos métodos. Esto significa que la modificación del algoritmo del protocolo TCP puede tener una mayor efectividad con el RTO calculado en el modelamiento y así obtener una mejora en el *throughput*, para ello se debe comprobar realizando la modificación del RTO en el algoritmo TCP y evaluarlo en aplicaciones en tiempo real.

Por otro lado, se podría realizar una optimización para la comunicación entre capas, para maximizar la eficiencia del protocolo y del enlace, basados en el modelamiento matemático descrito en este informe, el cual se lo podría realizar de una manera analítica y práctica, para así poder validar los resultados obtenidos mediante las simulaciones y en aplicaciones reales.

Bibliografía

Lenkurt Electric. (1978). *El Demodulador Lenkurt*. (L. E. Telecomunicaciones), Ed.) California, USA: G.T.E. Recuperado el 06 de Junio de 2013, de <http://www.qsl.net/lu9aum/diversidad.htm>

(2005). *IEEE Standard 802.11e*. New York: IEEE.

IEEE 802.16 y WiMAX. (5 de Diciembre de 2009). Obtenido de Telequismo: [http://images.telequismo.com/IMG/IEEE_802_16_\(Wimax\).pdf](http://images.telequismo.com/IMG/IEEE_802_16_(Wimax).pdf)

IEEE 802.16 y WiMAX. (5 de Diciembre de 2009). Obtenido de Telequismo: [http://images.telequismo.com/IMG/IEEE_802_16_\(Wimax\).pdf](http://images.telequismo.com/IMG/IEEE_802_16_(Wimax).pdf)

Ventajas y desventajas del estandar 802.11n. (29 de Septiembre de 2010). Obtenido de La Cueva WiFi : <http://www.lacuevawifi.com/CompraWifi/2010/09/29/ventajas-y-desventajas-del-estandar-802-11n/>

Albuja, C. M. (2011). *Implementación y evaluación de un nuevo algoritmo TCP para redes inalámbricas usando Network Simulator*. Quito: ESPE Escuela Politecnica del Ejercito.

Allman, M., Software, N. G., & Paxson, V. (Abril de 1999). *TCP Congestion Control*. Recuperado el 24 de 03 de 2013, de <http://www.ietf.org/rfc/rfc2581>

Área de Planificación y nuevas Tecnologías. (2009). *Las tecnologías WiFi y WiMAX. Jornada sobre despliegue de redes inalámbricas municipales (WIFI/WIMAX)* (pág. 41). Badajoz: Dipuyacion de Badajoz. Obtenido de http://www.dip-badajoz.es/agenda/tablon/jornadaWIFI/doc/tecnologias_wifi_wmax.pdf

Avalos, S. P. (2010). *Estudio de viabilidad técnica y económica para la migración de red WiFi a WiMAX en entornos rurales*. ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN. Madrid: Universidad Politecnica de Madrid. Obtenido de http://oa.upm.es/7395/1/PFCD_WIFI-WIMAX_SandraEspinoza.pdf

Barnes, R. L. (2008). *Red basada en Acceso Inalambrico*. Madrid: Universidad Autonoma de Madrid. Obtenido de <http://arantxa.ii.uam.es/~jms/pfcsteleco/lecturas/20080409RodrigoLopez.pdf>

Barrionuevo Zapata, E., & Tamayo Vegas, V. (2011). *Análisis Del Desempeño De Una Red Con Tecnología Wifi Para Largas Distancias En Un Ambiente Rural De La Región Sierra*. Sangolquí: ESPE Escuela Politécnica Del Ejército.

- Botta, A., Dainotti, A., & Pescap, A. (2011). *Multi-protocol and Multi-platform Traffic Generation and Measurement*. Napoli: Universita di Napoli Federico II. Recuperado el 28 de Marzo de 2013, de <http://wpage.unina.it/a.botta/pub/demoInfocom.pdf>
- Braden, R. (Octubre de 1989). *Requirements for Internet Hosts – Communication Layers, RFC 1122*. Recuperado el 27 de 03 de 2013, de <http://www.ietf.org/rfc/rfc1122>
- Brakmo, L., & Peterson, L. (s.f.). *TCP Vegas: New Techniques for Congestion detection and Avoidance*. Arizona: Department of Computer Science.
- Camacho, L., Quispe, R., Córdova, C., Liñán, L., & Chávez, D. (2009). WiLD WiFi Based Long Distance. *Grupo de Telecomunicaciones Rurales, 1*, 158. Obtenido de gtr.telecom.pucp.edu.pe/download/publicaciones/Wild.pdf
- Cano, I., & Almeida, F. (2012). *Análisis del Desempeño de una red con tecnología WiFi para largas distancias en la región costa del Ecuador*. Quito: Escuela Politécnica del Ejército.
- Capone, A., Fratta, L., & Martignon, F. (2004). *Bandwidth Estimation Schemes for TCP over Wireless Networks*. IEEE transactions on Mobile Computing.
- Casilari, E. (06 de Junio de 2006). *Universidad de Malaga - Docentes*. Recuperado el 10 de 10 de 2012, de Presentaciones: http://webpersonal.uma.es/~ECASILARI/Docencia/Memorias_Presentaciones_PFC/34Memoria_PFC.pdf
- Castillo, G. (Enero de 2005). *Ethernet y Protocolos TCP/IPv4*. Recuperado el 25 de Marzo de 2013, de <http://mixteco.utm.mx/~resdi/historial/materias/IPv4.pdf>
- Céspedes Sotomayor, D. F. (2008). *Elaboración de estudios de ingeniería utilizando la herramienta Sirenet para la planeación de sistemas radioeléctricos*. SANGOLQUI: ESPE- Escuela Politécnica Del Ejército. Recuperado el 22 de 05 de 2013, de <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/992>
- Choi, S.-H., Perry, D., & Nettles, S. (2008). *A Software Architecture for Cross-Layer Wireless Network Adaptations*. Austin, Texas: The University of Texas.
- Comunidad de Redes. (17 de Julio de 2011). *ACK Timeouts and the effects on distance links*. Obtenido de Air-Stream: www.air-stream.org/ack_timeouts
- Dalal, P., & Dasgupta, K. (2010). *TCP Cross Layer Adaptive Policy Throughput Optimization over Wireless Links*. 2010: National Conference on Communications (NCC).
- Departamento de Sistemas Telematicos y Computacion. (2013). *IEEE 802.11*. Madrid: Universidad Rey Juan Carlos. Obtenido de <http://gsyc.es/~mortuno/rom/02-802.11.pdf>

- Fernández Hernández, M., & Tavares Calafate, C. (2012). *Desarrollo de alternativas al protocolo TCP para redes inalámbricas*. Valencia: Escuela Técnica Superior de Ingeniería Informática, Universidad Politécnica de Valencia.
- Gont, F. (Febrero de 2012). *The Internet Engineering Task Force (IETF)*. Recuperado el 15 de Marzo de 2013, de <http://datatracker.ietf.org/doc/rfc6528/>
- González Casado, L. (01 de 2012). *Supercomputación - Algoritmos. Arquitectura de Computadores y Electrónica. Universidad de Almería*. Recuperado el 22 de 03 de 2013, de <http://www.hpca.ual.es/~leo/redes/Rel3-01-02.pdf>
- Hermosa, Ó. S. (2011). *Diseño e implementación de una red inalámbrica IEEE 802.11n. Línea de base enfocada a un sistema de videoconferencia para realizar teleconsultas entre centros de salud de comunidades aisladas de la Amazonía peruana*. Lima: PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE PERÚ. Obtenido de <http://es.scribd.com/doc/109016403/Proyecto-Fin-de-Carrera-PFC-Oscar-Santos-Hermosa-MUY-BUENO>
- IEEE Standard. (1997). *802.11 Standard Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification*. New York: IEEE.
- IEEE, C. S. (2003). *802.11e Standard*. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.
- IEEE_802_16_(Wimax).pdf*. (s.f.). Obtenido de [http://images.telequismo.com/IMG/IEEE_802_16_\(Wimax\).pdf](http://images.telequismo.com/IMG/IEEE_802_16_(Wimax).pdf)
- Lara, R. (02 de 07 de 2012). *Proyecto TCP WILD*. ESPE. Sangolqui: CIRAD Centro de Investigación de Redes Ad-Hoc.
- Lara, R., & Simó, J. (2012). *Performance Analysis of Uplink Capacity in IEEE 802.16j Transparent Mode*. Madrid: Departamento de Eléctrica y Electrónica de la Escuela Politécnica del Ejército; Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, Universidad Rey Juan Carlos.
- Linux Voyage*. (s.f.). Recuperado el 05 de junio de 2013, de www.voyage.hk
- Liu, W., & Carolyn, M. (2006). *TCP/IP Tutorial and Technical Overview*. IBM Redbook.
- Manual SIRENET. (2007). *Manual Sirenet versión 3.0*. Espana: Intelia Consultores S.L.
- Meza, A. A., & Santamaria, M. Y. (2007). *Scrib*. Recuperado el 12 de Octubre de 2012, de <http://es.scribd.com/doc/49591981/41/TCP-y-UDP-inalambricos>
- Moreno Vozmediano, R., Montero, R., & Fabero Jiménez, J. C. (s.f.). *Facultad de Informática - Universidad Complutense de Madrid*. Recuperado el 20 de Marzo de 2013, de

<http://www.fdi.ucm.es/profesor/rmoreno/redes-grado/transparencias/Tema%207-%20La%20capa%20de%20transporte.%20Protocolos%20UDP%20y%20TCP.pdf>

- Nagle, J. (Enero de 1984). *Congestion Control in IP/TCP Internetworks*. (F. A. Corporation, Ed.) Recuperado el 22 de 03 de 2013, de <http://www.ietf.org/rfc/rfc896>
- Nolasko, J. E. (14 de 08 de 2012). *Scribd - Token Ring*. Recuperado el 12 de 10 de 2012, de <http://es.scribd.com/doc/102885030/Token-Ring>
- Olmedo, G. (2008). *Controle de Congestionamento do Protocolo TCP em Sistemas de Comunicação sem fio CDMA usando estratégias de detecção multiusuário, arranjo de antenas e correção de erro FEC*. Brasil: UNICAMP Universidad Estatal de Campinas.
- Ortega Andrade, J. (Marzo de 2009). *Estudio y diseño de la red nacional de datos del Servicio Social de la Fuerza Terrestre (SSFT) usando tecnología inalámbrica de banda ancha*. Quito- Ecuador: Escuela Politécnica Nacional. Recuperado el 06 de Junio de 2013, de <http://dspace.epn.edu.ec/bitstream/15000/8489/3/T%2011131%20CAPITULO%201.pdf>
- Padhye, J., Firoiu, V., Towsley, D., & Kurose, J. (s.f.). *Modeling TCP reno performance: A simple model and its empirical validation*. IEEE/ACM Transactions on Networking.
- Perez, F. D. (2011). *Repositorio Digital ESPE*. Recuperado el 15 de Abril de 2013, de <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/4515/1/T-ESPE-032660.pdf>
- Pilo-País, P. (2011). *Verificación del desempeño de un nuevo algoritmo de control de congestión en entornos inalámbricos reales mediante la modificación del protocolo TCP en el kernel de LINUX*. Sangolquí- Ecuador: ESPE Escuela Politécnica Del Ejército.
- Postel, J. (Septiembre de 1981). *The Internet Engineering Task Force (IETF)*. Recuperado el 15 de 03 de 2013, de <http://www.ietf.org/rfc/rfc0793>
- Pozo, N. A. (2009). *Estudio y diseño de una red LAN inalámbrica con calidad de servicio, para voz y datos en el colegio de ingenieros geólogos, minas y petróleo (CIGMYP) empleando los estándares IEEE 802.11g, IEEE 802.11e*. Quito: Escuela Politécnica Nacional. Obtenido de <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/1316/1/CD-2019.pdf>
- Rodríguez, F., & Vidal, L. A. (2004). *TCP sobre enlaces wireless: Problemas y algunas posibles soluciones existentes*. Uruguay: Instituto de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República.

- Seth, S., & Venkatesulu, M. (2008). *TCP/IP architecture, design, and*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Soto, O. A. (2011). *Comparación de la eficiencia volumétrica entre redes inalámbricas WiFi y WiMAX*. México D.F. : Universidad Nacional Autónoma de México.
- Stevens, W. N. (Enero de 1997). *"TCP Slow Start, Congestion Avoidance, Fast Retransmit, and Fast recovery Algorithms* . Recuperado el 22 de 05 de 2013, de <http://www.ietf.org/rfc/rfc2001>
- Systems, A. (2012). ALB-250 Series - 5 GHz band Datasheet. Madrid: Albentia Systems S.A.
- Systems, A. (Noviembre de 2012). *ARBA-RPT-50: Repetidor WiMAX*. Recuperado el 15 de Abril de 2013, de http://www.albentia.com/Docs/ARBA-RPT-50_March%202011.pdf
- Tanenbaum, A. (2003). *Redes de computadoras*. Mexico: Pearson.
- Tanenbaum, A. (2003). *Redes de computadoras* (Cuarta ed.). México: Pearson Educación.
- Toapanta Banda, B. A. (2006). *Diseño e implementación de un prototipo de switch capa 3 básico basado en linux*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Ullari, O. E., & Cruz, H. S. (2006). *Normas 802.11a, 802.11b y 802.11g*. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana. Obtenido de <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/221/4/Capitulo%203.pdf>
- V. Erceg, L. J. (1999). *An empirically based path loss model for wireless channels in suburban environments*. IEEE .
- Vasquez Herrera, M. A. (2001). *Colector de Paquetes TCP*. Escuela Politécnica Nacional , Escuela de Ingeniería. Quito: Escuela Politécnica Nacional .
- Velásquez, K., & Gamess, E. (2009). *Análisis Comparativo de Herramientas de Evaluación de Desempeño en Redes de Computadores*. Caracas: Centro de Investigación en Comunicación y Redes (CICORE).
- Xie, H., Pazzi, R., & Boukerche, A. (2012). *A Novel Cross Layer TCP Optimization Protocol over Wireless Networks by Markov Decision Process*. IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM).
- Xu, K., Tian, Y., & Ansari, N. (2004). *TCP-Jersey for Wireless IP Communications*. IEEE Journal on Selected Areas in Communications.

ACTA DE ENTREGA

El proyecto de grado titulado “**Evaluación del desempeño del protocolo TcP para un enlace inalámbrico de larga distancia inter-islas en la Región Insular**” fue entregado al Departamento de Eléctrica y Electrónica y reposa en la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.

Sangolquí, a _____

Srta. Andrea Mishel Acosta Morales
AUTOR

Sr. Vicente Javier Sandoval Reyes
Autor

Ing. Darío Duque Cajas

DIRECTOR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA EN ELETRÓNICA EN
TELECOMUNICACIONES