

TESIS DEFENDIDA POR
Eduardo José Patrón Aguilar
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ

M. C. Raúl Rivera Rodríguez
Director del Comité

Dr. David Hilario Covarrubias Rosales
Miembro del Comité

Dr. Roberto Conte Galván
Miembro del Comité

Dr. Pedro Negrete Regagnón
Miembro del Comité

Dra. María del Carmen Maya Sánchez
*Coordinador del programa de posgrado
en Electrónica y Telecomunicaciones*

Dr. David Hilario Covarrubias Rosales
Director de Estudios de Posgrado

22 de Enero de 2010.

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DE ENSENADA**



**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS
EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

**RESERVACIÓN DINÁMICA DE QOS EN REDES WIMAX 802.16E UTILIZANDO
DISEÑO CROSS-LAYER DESIGN**

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado
de
MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta:

EDUARDO JOSÉ PATRÓN AGUILAR

Ensenada, Baja California, México, enero del 2010.

RESUMEN de la tesis de **Eduardo José Patrón Aguilar**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS en Electrónica y Telecomunicaciones con orientación en Telecomunicaciones. Ensenada, Baja California. Enero de 2010.

RESERVACIÓN DINÁMICA DE QOS EN REDES WIMAX 802.16E UTILIZANDO DISEÑO CROSS-LAYER DESIGN

Resumen aprobado por:

M. C. Raúl Rivera Rodríguez
Director de Tesis

La transmisión de la videoconferencia sobre un canal inalámbrico representa una gran cantidad de retos, que van desde el ruido, interferencia y la movilidad. Con el fin de reducir las pérdidas causadas por los fenómenos mencionados, las tecnologías de comunicación inalámbricas presentan contramedidas a estos fenómenos que deterioran la señal. Sin embargo, esta reducción de pérdidas y errores que se presentan llevan a reducir la tasa de bit que pueda ofrecer la tecnología empleada. En este trabajo de tesis analizaremos la tecnología WiMAX, la cual ofrece servicios tanto a redes de computadoras como a equipos móviles (celulares). Existen mecanismos que permiten a WiMAX distinguir entre los distintos tipos de tráfico, dando cierta prioridad al tráfico en tiempo real, como lo es la videoconferencia.

Sin embargo, las tecnologías no están diseñadas para tener comunicación directa con la aplicación que se esté utilizando, ya que están hechas para funcionar con la aplicación que sea, y solo especifican el envío de bits y como se va a lidiar con el canal inalámbrico.

En este trabajo de tesis se presenta una propuesta basada en Cross-Layer Design, lo que permite hacer modificaciones directamente a nivel de la capa de aplicación dependiendo de las condiciones medidas a nivel de la capa física. Los resultados obtenidos demuestran como la propuesta de este trabajo de tesis mejora significativamente la calidad de la transmisión de una videoconferencia, así como los parámetros de calidad de servicio percibidos por el usuario final.

Palabras Clave: WiMAX, Cross-Layer Design, Videoconferencia, PSNR.

ABSTRACT of the thesis presented by **Eduardo José Patrón Aguilar** as a partial requirement to obtain the MASTER OF SCIENCE degree in Electronics and Telecommunications with orientation in Telecommunications. Ensenada, Baja California, Mexico. January 2010.

QOS DINAMIC RESERVATION ON WIMAX 802.16E WIMAX NETWORKS USING CROSS-LAYER DESIGN

Videoconference transmission over a wireless channel represents many challenges, like noise, interference and mobility. In order to reduce losses caused by the phenomena mentioned above, wireless communication technologies have countermeasures to these phenomena that degrade the signal. However, this reduction in losses and errors decrease the bit rate that the technology used can offer. In this thesis we discuss WiMAX technology, which offers services to computer networks and mobile networks (cell phones). There are tools that enable WiMAX to distinguish between different types of traffic, giving some priority to real time traffic, such as videoconferencing.

However, the technologies are not designed to have direct communication with the application being used, since they are made to run all kind of applications, only sending bits is specified and how it will cope with the wireless channel.

In this work, a proposal is presented based on Cross-Layer Design, which allow to do modifications on the application layer level depending on the conditions measured at the physical layer level. Results demonstrate that the proposal on this work significantly improves the quality on videoconference transmission and the quality of service parameters perceived by the end user.

Keywords: WiMAX, Cross-Layer Design, Videoconference, PSNR.

A mis padres: Eduardo y Verónica
A mis hermanos: Verónica y Emiliano
A Cecilia

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi familia, por ser el apoyo principal en esta etapa de mi vida, así como mi fuente de inspiración.

A mi asesor, el M.C. Raúl Rivera Rodríguez, por permitirme realizar este trabajo con él, por su apoyo y sus consejos que no solo fueron en el sentido académico, sino también en el lado personal.

A los miembros del comité de tesis, el Dr. David Hilario Covarrubias, el Dr. Roberto Conte Galván y el Dr. Pedro Negrete Regagnon, por sus valiosas aportaciones a este trabajo, que no sólo se limitaron a las reuniones de avance de tesis, si no en todo momento.

Un agradecimiento especial al Dr. Arturo Velázquez Ventura, por la confianza que me dio para poder ingresar y permanecer en esta institución. También a todos los maestros y doctores que impartieron clases y compartieron conocimientos.

Agradezco a todos mis compañeros de generación: Adán Sepúlveda, Alejandro Pérez, Cecilia Coria, Daniel Escobedo, Daniel García, Israel Oropeza, Iván Herrera, Jacobo Montoya, Jaquelin Estrada, Jesús Flores, Juan Carlos González, Miguel Ángel Vázquez, Nahiv Mandujano y Paulino Mendoza, por los momentos que compartimos dentro y fuera de la institución.

Quiero agradecer en especial al M.C. Oscar Eduardo Olivares Domínguez y al M.C. Paulino de Jesús Mendoza Valencia, por brindarme el apoyo y el tiempo en mi tema de investigación, a pesar de tener sus propias ocupaciones, y que a final de cuentas, me permitieron llegar a estas instancias.

Un agradecimiento muy especial a Cecilia Coria Calvario, quien ha sido mi compañera de estudios, amiga y mi apoyo en todo este tiempo. Muchas gracias de todo corazón.

Al CICESE y a todo su personal, por permitirme estudiar en una institución tan valiosa y reconocida.

Al CONACYT, por el apoyo económico brindado, permitiendo así que mi única preocupación fueran mis estudios.

CONTENIDO

	Página
Resumen español.....	i
Resumen inglés.....	ii
Dedicatorias.....	iii
Agradecimientos.....	iv
Contenido.....	vi
Lista de Figuras.....	viii
Lista de Tablas.....	x
Lista de Acrónimos.....	xi
I. Introducción.....	1
I.1 Marco teórico	1
I.2 Antecedentes	4
I.3 Planteamiento del problema	5
I.4 Objetivos	6
I.5 Metodología de investigación	7
I.6 Infraestructura empleada	8
I.7 Organización de la tesis	9
II. Fundamentos teóricos.....	10
II.1 WiMAX	10
II.1.1 OFDM	13
II.1.2 Ranura y estructura de la trama	15
II.2 Videoconferencia	16
II.2.1 H.264	17
II.2.2 PSNR	19
II.3 Cross-Layer Design	21
II.3.1 Aproximaciones	22
II.3.2 Arquitectura	23
II.4 Conclusiones del Capítulo II	24
III. Diseño de Cross-Layer.....	25
III.1 Diseño de Cross-Layer propuesto	25
III.1.1 Abstracción de parámetros de la capa de aplicación	28
III.1.2 Abstracción de parámetros de la capa de radio	33
III.1.3 Optimizador del diseño de Cross-Layer	35
III.2 Modelado matemático del diseño de Cross-Layer propuesto	36
III.2.1 Abstracción de parámetros	36
III.2.1.1 Parámetros de la capa de radio	37
III.2.1.2 Parámetros de la capa de aplicación	39

CONTENIDO (continuación)

III.2.1.3 Parámetros de Cross-Layer	40
III.2.2 Optimizador de Cross-Layer	41
III.2.2.1 Función objetivo	42
III.2.3 Distribución de decisiones	44
III.3 Conclusiones del Capítulo III	44
IV. Resultados de la simulación y análisis numérico.....	46
IV.1 Consideraciones de las simulaciones	46
IV.2 Resultados de las simulaciones	49
IV.2.1 Análisis de pérdidas de paquetes de datos	49
IV.2.1 Análisis de distorsión de la imagen	57
IV.3 Conclusiones del Capítulo IV	63
V. Análisis de los resultados y conclusiones.....	64
V.1 Análisis de los resultados	64
V.2 Conclusiones	65
V.3 Trabajo futuro	67
Bibliografía.....	69
Anexo A. Caracterización de las fuentes de tráfico.....	71
Anexo B. Modelo de WiMAX en Simulink.....	75

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Metodología de investigación empleada en el desarrollo de la tesis.....	7
2	Estructura de la trama usando TDD en WiMAX.....	15
3	Cuadro de un video (mostrando ejemplos de zonas homogéneas)	18
4	Muestras en el tiempo y en el espacio de una secuencia de video	18
5	Ejemplos de PSNR.....	20
6	Imagen con el fondo borroso (PSNR = 27.7 dB).....	20
7	Esquema general del sistema CLD propuesto.....	27
8	Tipos de escena.....	29
9	Tasa de bit generado en una configuración de 160 x 120 a 10 cuadros por seg.....	30
10	Tasa de bit generada por la aplicación de videoconferencia.....	31
11	Tráfico generado por el codificador H.264 para las distintas resoluciones y cuadros por segundo.....	32
12	Relación de SNR del canal y la BER generada.....	35
13	SNR del canal a lo largo de 10 seg. con una frecuencia doppler de 366 Hz.....	50
14	Transmisión de video sin CLD en un canal inalámbrico dispersivo	51
15	Transmisión de video con CLD en un canal inalámbrico dispersivo	51
16	SNR de un canal inalámbrico (decaimiento lento).....	52
17	Transmisión de video sin CLD en un canal inalámbrico con decaimiento lento.....	53
18	Transmisión del video con CLD en un canal inalámbrico con decaimiento lento.....	53
19	SNR de un canal inalámbrico (decaimiento y recuperación abruptos).....	54
20	Transmisión de video sin CLD en un canal inalámbrico con decaimiento y recuperación abruptos.....	54

LISTA DE FIGURAS (continuación)

Figura		Página
21	Transmisión del video con CLD en un canal inalámbrico con decaimiento y recuperación abruptos.....	54
22	SNR de un canal inalámbrico (cambios lentos).....	55
23	Transmisión de video sin CLD en un canal inalámbrico con cambios lentos.....	56
24	Transmisión del video con CLD en un canal inalámbrico con cambios lentos.....	56
25	Distorsión generada en la imagen dentro de un GOP según el cuadro perdido.....	58
26	PSNR del video sin CLD en un canal inalámbrico con decaimiento lento.....	59
27	PSNR del video con CLD en un canal inalámbrico con decaimiento lento.....	59
28	PSNR del video sin CLD en un canal inalámbrico con decaimiento y recuperación abruptos.....	59
29	PSNR del video con CLD en un canal inalámbrico con decaimiento y recuperación abruptos.....	59
30	PSNR del video sin CLD en un canal inalámbrico con cambios lentos.....	60
31	PSNR del video con CLD en un canal inalámbrico con cambios lentos.....	60
32	CDF para la PSNR utilizando y sin utilizar CLD.....	62
33	Modelo de las capa física y capa de enlace de datos de WiMAX realizado en Simulink.....	76

LISTA DE TABLAS

Tabla		Página
I	Características de las distintas revisiones de WiMAX.....	11
II	Tasas de bit en el enlace de subida de WiMAX.....	34
III	Comparación de pérdidas sin y con CLD en un canal con decaimiento lento.....	53
IV	Comparación de pérdidas sin y con CLD en un canal con decaimiento y recuperación abruptos.....	55
V	Comparación de pérdidas sin y con CLD en un canal con cambios lentos.....	56
VI	Coeficientes de la CDF correspondiente a la PSNR del sistema sin la implementación CLD.....	61
VII	Coeficientes de la CDF correspondiente a la PSNR del sistema con la implementación CLD.....	61
VIII	Configuraciones de video utilizadas en el programa JMStudio para la caracterización de fuentes de tráfico.....	73
IX	Comparación entre la cantidad de SNR estipulada en el estándar y la simulación para los diferentes esquemas de modulación y tasas de codificación.....	79

LISTA DE ACRÓNIMOS

BER	Bit Error Rate (Tasa de Bit Errónea)
BS	Base Station (Estación Base)
CLD	Cross-Layer Design (Diseño de Capa Cruzada)
FDD	Frecuency Division Duplexing (Duplexación por División de Frecuencias)
FFT	Fast Fourier Transform (Transformada Rápida de Fourier)
GHz	Gigahertz
GOP	Group of Pictures (Grupo de Imágenes)
IDFT	Inverse Discrete Fourier Transform (Transformada Inversa Discreta de Fourier)
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform (Transformada Inversa Rápida de Fourier)
ISI	Intersymbol Interference (Interferencia Intersimbólica)
Kbps	Kilobits por segundo
LOS	Line Of Sight (Trayectoria de Visibilidad Directa)
MAC	Media Access Control (Control de Acceso al Medio)
Mbps	Megabits por segundo
MSE	Mean Square Error (Error Cuadrático Medio)
OFDM	Orthogonal Frecuency Division Multiplexing (Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales)
OFDMA	Orthogonal Frecuency Division Multiple Access (Acceso Multiple por División de Frecuencias Ortogonales)
OSI	Open System Interconnection (Interconexión de Sistemas Abiertos)
PSNR	Peak Signal-to-Noise Ratio (Relación Señal a Ruido Pico)
QAM	Quadrature Amplitude Modulation (Modulación de Amplitud en Cuadratura)
QoS	Quality of Service (Calidad de Servicio)
SNR	Signal-to-Noise Ratio (Relación Señal a Ruido)
TDD	Time Division Duplexing (Duplexación por División de Tiempo)

TDM	Time Division Multiplexing (Multiplexación por División de Tiempo)
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access

Capítulo I

Introducción

I.1 Marco teórico.

La dirección en la que avanza la tecnología en el área de las telecomunicaciones está marcada por la tendencia a la convergencia. Hoy en día, es común hablar de redes de comunicaciones por las cuales transita distinto tipo de tráfico (datos, voz, video), sin embargo, existe la necesidad de hacer distinción entre los diferentes tipos de servicios (tráfico) para poder satisfacer las necesidades de los clientes o usuarios finales. Además, existe otra componente importante inherente a la necesidad de libertad por parte de los usuarios, por lo que es importante que estas redes y sus servicios sean considerados en entornos inalámbricos con características de movilidad¹.

El propósito de poder hacer distinción entre el tipo de tráfico, es fundamental para poder ofrecer Calidad de Servicio (QoS). QoS es garantizar la transmisión de cierta cantidad de datos en un tiempo dado, esto con la finalidad de que el usuario final tenga una experiencia satisfactoria utilizando un servicio. El concepto de QoS es frecuentemente utilizando cuando se habla de tráfico en tiempo real, como lo es la voz y el video. Ofrecer garantías de QoS para el tráfico en tiempo real es sumamente complicado, dado que es sensible al retardo. Aumentar la calidad del video implica aumentar la cantidad de

¹ Al hablar de movilidad nos referimos a movilidad a velocidad vehicular (aprox. 120 km/hr).

información a enviar, y esto puede provocar encolamientos y retardos, ya que es más complicado procesar la señal. Es por eso que existen distintos estudios y propuestas en las que se evalúa el compromiso que existe entre la calidad del video y el retardo.

En este trabajo de tesis se analiza el servicio de videoconferencia como una de las aplicaciones sensibles a retardos que exige alta calidad en el servicio. La videoconferencia es una sesión de audio y video que se establece entre dos personas o grupos de personas para comunicarse en tiempo real. Es importante hacer notar la diferencia entre la videoconferencia y el video streaming², ya que mientras la videoconferencia es en tiempo real, el video streaming es transmitido y en el extremo receptor almacenado de forma temporal en un búfer³, para posteriormente ser reproducido. Tomando así todo este proceso de retardos prolongados que no afectan a la información del video debido a que previamente este fue digitalizado en un tiempo pasado.

Los retardos se pueden dar por diversos factores, entre los que destacan el tiempo de procesamiento del codificador y el encolamiento de datos. Mientras que los retardos por el tiempo de procesamiento del codificador se dan por las características del software utilizado, el fenómeno de encolamiento suele darse porque la cantidad de información que se desea enviar es más de la que la tecnología de comunicaciones puede enviar, en un momento determinado. Esto puede ser provocado por congestión en la red de datos o en los enlaces de comunicación asimétricos, esto es, cuando el usuario solicita información a través de la red, es posible contar con una grandes tasas de bit; sin embargo, en el caso de querer enviar información la conexión es de capacidad limitada. Esto se debe a que generalmente los enlaces son asimétricos, es decir, no se puede enviar información con la misma velocidad con la que se recibe. Actividades como revisar el correo electrónico, navegar en internet o ver video bajo demanda, requieren de que el usuario pueda recibir

² Se refiere a un archivo de video que se puede ver directamente desde el servidor sin necesidad de descargarlo completamente.

³ Memoria temporal que sirve para almacenar información de un archivo el cual se está procesando

la información con velocidad, sin importar pequeños retardos; no sucede lo mismo con la videoconferencia, donde se requiere el envío y recepción de datos a casi la misma velocidad⁴.

Desde el año 2004, surgió una tecnología llamada WiMAX, la cual ofrece grandes tasas de bit en un área metropolitana de manera inalámbrica. En su versión inicial no ofrecía movilidad, sin embargo, 2 años más tarde saldría a la luz una nueva versión que ofrece movilidad a velocidades vehiculares.

WiMAX cuenta con técnicas con las cuales puede contrarrestar los efectos del canal, para evitar la pérdida de datos. Sin embargo, el precio que se tiene que pagar es la disminución en la tasa de bit que se puede ofrecer, lo cual representa un problema significativo para algunas aplicaciones, como la videoconferencia [Kwon et al., 2007].

Los intentos por mejorar la QoS en la transmisión de una videoconferencia se pueden centrar en diferentes aspectos, tales como:

- Sistemas avanzados de encolamiento,
- Adaptación dinámica de la aplicación.

La mayor parte de estas estrategias están optando por adoptar un Diseño de Capas Cruzadas (CLD), en el cual se intenta sacar provecho de la información que tiene una capa (haciendo referencia a un modelo por capas, como el modelo OSI) para que lo utilice otra capa no adyacente.

⁴ No se puede asumir que se requiere la misma velocidad, ya que la configuración en los equipos puede no ser la misma

En este trabajo se propone utilizar CLD para la adaptación dinámica en la capa de aplicación (donde la aplicación es una videoconferencia) dependiendo de la capacidad de transmisión de la tecnología debido al estado del canal en el enlace ascendente⁵.

I.2 Antecedentes.

El estudio en el área de QoS en tecnologías inalámbricas no es nuevo. Hoy en día, una solución para mejorar la calidad en el servicio se basa en el uso de CLD. Esto es porque el canal inalámbrico puede crear problemas nuevos que una arquitectura por capas convencional no pueda manejar; por otro lado, puede haber situaciones favorables, las cuales un modelo CLD pueda ser utilizado [Srivastava y Motani, 2005].

[Makarevitch, 2007] enfoca su estudio en la diferenciación que ofrece WiMAX a cada tipo de tráfico. Esto lo hace en base a un algoritmo que decida en tiempo real y de mejor manera la forma en que acomoda el tráfico y establecer sus prioridades. Cabe señalar que este trabajo considera una propuesta CLD en la que interactúan la radio base y el dispositivo móvil, donde la radio base es la encargada de hacer recomendaciones al móvil que puede mejorar la calidad en la transmisión. Sin embargo, propuestas como esta requieren toda una infraestructura de equipo que entienda las señalizaciones para la optimización CLD, lo que puede generar problemas de compatibilidad.

El trabajo de [Triantafyllopoulou et al., 2007] propone un mecanismo CLD controlado por la Estación Base (BS) la cual hace recomendaciones de control en la modulación y codificación según las condiciones del canal, basándose en las pérdidas de paquetes o expiración del mismo debido al encolamiento.

⁵ Enlace que va desde el usuario hacia la radio base.

Otros esfuerzos, como el de (Lai-U Choi, 2006) se concentran en el envío de video bajo demanda en un entorno multiusuario, utilizando un acoplamiento CLD. Este estudio obtiene parámetros de la capa física y de aplicación, con el fin de realizar una optimización maximizando la relación señal a ruido pico (PSNR) de la imagen. Maximizando la PSNR se puede minimizar la distorsión en la imagen.

Estos y otros trabajos centran sus esfuerzos en el canal descendente (Forward-Link) que va hacia el usuario. Existe poca atención al enlace ascendente (Reverse-Link), aunque este sea el que más afectado resulta debido al escenario de uso del canal inalámbrico y limitaciones de los equipos móviles.

Uno de los trabajos que centra su estudio en el enlace ascendente, es el trabajo realizado por [Olivares Domínguez, 2007], en el cual se propone una solución similar a la propuesta en este trabajo, donde se explotan las posibilidades que ofrece CLD para poder cambiar los parámetros de videoconferencia según los niveles de potencia medidos, usando la tecnología celular cdma2000 1xEV-DO Rev. 0.

I.3 Planteamiento del problema.

La transmisión de una videoconferencia sobre el canal inalámbrico presenta retos, si se considera la agresividad del medio físico de transmisión como los problemas que puedan surgir debido a la movilidad. Uno de los problemas es el efecto Doppler, el cual ocasiona un aparente cambio de frecuencia en una onda, y depende directamente de la velocidad a la que se esté moviendo el transmisor.

La mayor parte de las investigaciones están enfocadas en mejorar la comunicación en el enlace descendente. Sin embargo, el enlace ascendente sufre de limitaciones debido a

varios factores como: capacidad de procesamiento de las estaciones móviles, planes de ahorro en el consumo de energía, entre otros.

Algunas tecnologías de comunicación inalámbrica pueden contar con mecanismos que permiten adaptar la tasa de bit que se pueda generar en base a las condiciones del canal. Esto significa que se puede reducir considerablemente la tasa de bit errónea en el receptor. Sin embargo, en los niveles superiores no existe una notificación que indique lo que está sucediendo con el canal inalámbrico, debido a que el modelo tradicional por capas (como el modelo OSI) no permite la comunicación entre capas no adyacentes.

Si la aplicación genera datos a cierta tasa de bit, que depende directamente de la configuración establecida en el codificador, es posible que se generen encolamientos cuando en algún momento determinado las condiciones del canal se degraden, y así obliguen a las contramedidas de WiMAX a reducir el caudal eficaz que ofrece. Estos encolamientos, pueden generar pérdidas de paquetes, degradación de la calidad de la señal enviada, provocando una disminución en la QoS.

I.4 Objetivos.

El objetivo general de esta tesis, es realizar un modelo basado en CLD que permita la interacción entre la capa de aplicación (videoconferencia) y la capa física (WiMAX) de tal manera que se puedan notificar los cambios del canal a la capa de aplicación, para poder adaptar la configuración del video y utilizar de manera eficiente el enlace ascendente, a pesar de sus limitantes.

Los objetivos particulares que se han fijado para esto son:

- Caracterizar las fuentes de tráfico para obtener un modelo matemático que describa el comportamiento del codificador de video H.264,

- Obtener las curvas de SNR contra BER para poder determinar los umbrales de adaptación de los esquemas de modulación y tasa de codificación.
- Implementar el diseño propuesto de Cross-Layer Design y comparar el comportamiento en la transmisión sin la utilización de la propuesta.

Para poder obtener las curvas SNR vs. BER, será necesario hacer la simulación de WiMAX, utilizando las características definidas en el estándar 802.16e de la IEEE.

I.5 Metodología de investigación.

La metodología empleada en la investigación se muestra en la figura 1.

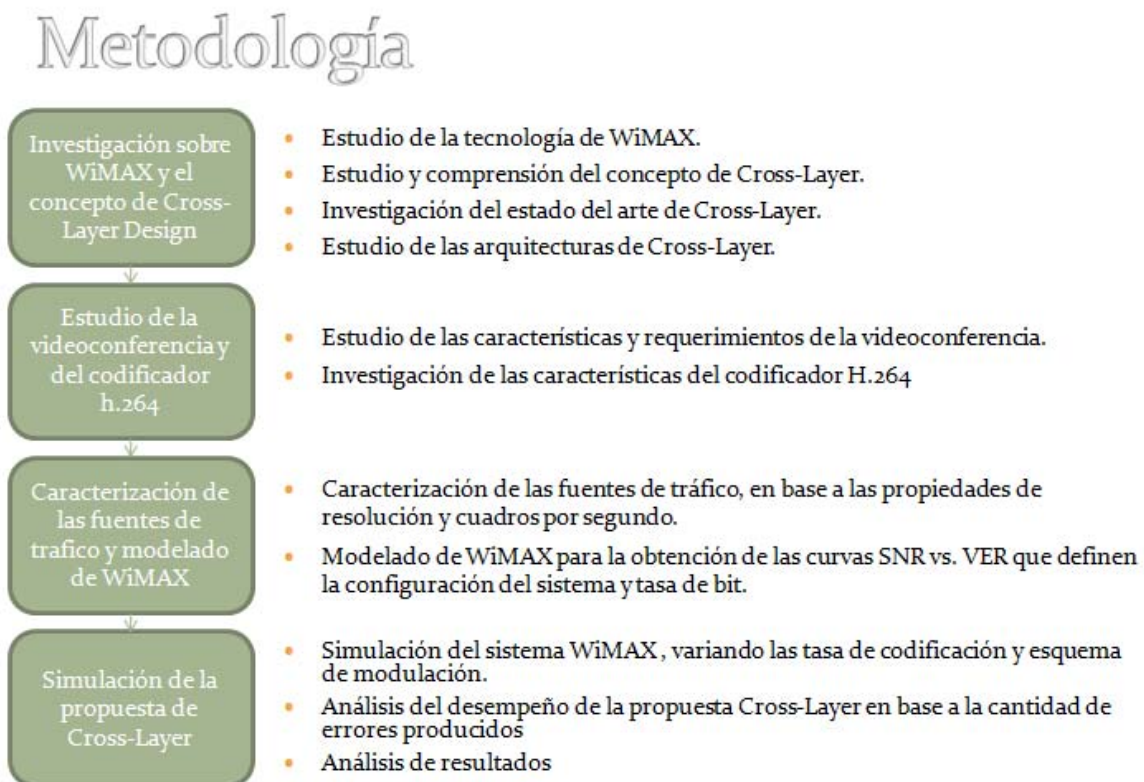


Figura 1. Metodología de investigación empleada en el desarrollo de la tesis.

I.6 Infraestructura empleada.

Para el desarrollo de este trabajo, se utilizó principalmente una computadora personal portátil con las siguientes características:

- Procesador AMD Turion 64 X2 Mobile a 1.9 GHz
- 2.5 GB de memoria RAM
- Tarjeta de video NVIDIA GeForce 7150 512 MB
- Sistema operativo Windows XP SP3

En la parte de la caracterización de las fuentes de tráfico, fue necesario utilizar lo siguiente:

- Wireshark v 1.0.0, programa analizador de paquetes
- JM Studio, programa para generar las secuencias de video.
- Codificador H.264, códec utilizado para la compresión de video.
- Cámara de video (integrada en el equipo de cómputo)

La obtención de las curvas de BER vs. SNR se obtuvieron a partir de los siguientes programas:

- Matlab R2008b
- Simulink

La implementación de la propuesta de este trabajo de tesis, se realizó utilizando solamente Matlab.

I.7 Organización de la tesis.

Este trabajo se encuentra organizado de la siguiente manera: en el Capítulo II se definen los elementos claves que conforman este trabajo de investigación: los conceptos básicos de la tecnología empleada, la cual es WiMAX, para entender cómo es posible aplicar la propuesta realizada en este trabajo; por otro lado la aplicación usada, que es la videoconferencia, para comprender las implicaciones que conlleva su transmisión y comprender porque es necesario realizar una adaptación como la propuesta; y por último, el concepto más relevante para este trabajo, el cual es Cross-Layer Design. En el Capítulo III, se encuentra el desarrollo correspondiente a la formalización matemática de la propuesta Cross-Layer Design, donde se definen los elementos que involucran tanto a la videoconferencia como a WiMAX y como se llevara a cabo la optimización. En el Capítulo IV se presentan los resultados de las simulaciones realizadas, y se presentan dos maneras de analizar los resultados, una en forma cuantitativa y otra en forma cualitativa. En el Capítulo V se hace un análisis de los resultados, se presentan las conclusiones y se hacen recomendaciones para trabajos futuros.

Capítulo II

Fundamentos teóricos

En este capítulo se revisarán las características básicas de WiMAX enfatizando la importancia que tiene en el mundo de las comunicaciones inalámbricas; además el concepto de videoconferencia, sus características e implicaciones; por último, se darán a conocer los conceptos básicos de CLD analizando las ventajas que ofrece su implementación a la hora de tratar con el tráfico en tiempo real.

II.1 WiMAX.

WiMAX es una tecnología de comunicaciones inalámbricas de banda ancha. Está basada en el estándar de la IEEE 802.16-2004 y su enmienda 802.16e.

El enfoque inicial del grupo que desarrollo el estándar, fue el de un sistema inalámbrico de banda ancha con trayectoria de visibilidad directa punto a multipunto, que operaba en el intervalo de los 10 GHz a los 66 GHz. Además, a nivel de capa física, utilizaba una sola portadora, y a nivel de la capa MAC usaba multiplexación por división en el tiempo (TDM, por sus siglas en ingles).

Para las siguientes revisiones, se incluía la capacidad de no tener trayectoria de visibilidad directa (LOS, por sus siglas en inglés), así como utilizar las bandas que van desde los 2 GHz a los 11 GHz. Las diferentes características de cada una de las revisiones se encuentran en la tabla I.

Tabla I. Características de las distintas revisiones de WiMAX

	802.16	802.16-2004	802.16e-2005
Terminado en:	Diciembre de 2001	Junio de 2004	Diciembre de 2005
Bandas	10 GHz – 66 GHz	2 GHz – 11 GHz	2 GHz – 11 GHz Fijo 2GHz – 6 GHz Móvil
Aplicación	Fijo con LOS	Fijo sin LOS	Fijo y móvil sin LOS
Arquitectura MAC	Punto a multipunto Malla	Punto a multipunto Malla	Punto a multipunto Malla
Esquema de transmisión	Sólo subportadora única	Subportadora única, 256 OFDM o 2048 OFDM	Subportadora única, 256 OFDM u OFDM escalable con 128, 512, 1024 o 2048 subportadoras
Modulación	QPSK, 16 QAM, 64 QAM	QPSK, 16 QAM, 64 QAM	QPSK, 16 QAM, 64 QAM
Tasa de transmisión bruta⁶	32 Mbps – 134.4 Mbps	1 Mbps – 75 Mbps	1 Mbps – 75 Mbps

WiMAX tiene algunas características que la hacen un candidato sólido no sólo para prestar servicios que ofrecen los puntos de acceso de las redes WiFi actuales, sino también ofrecer los servicios móviles de las compañías celulares. Algunas de estas características son [Andrews et al., 2007]:

⁶ Se refiere a la tasa de transmisión que considera tanto a los datos de usuario como los de encabezado.

- **Capa física basada en OFDM:** este esquema ofrece gran resistencia a las multitrayectorias y permite operar en condiciones sin LOS. OFDM es reconocido actualmente como el método por elección para mitigar las multitrayectorias en redes inalámbricas de banda ancha.
- **Tasas de datos altas:** se pueden alcanzar los 74 Mbps cuando se opera con un canal de 20 MHz de amplitud espectral. Lo típico es utilizar un espectro de 10 MHz utilizando TDD con un radio de 3:1 en los enlaces de bajada a subida. Este pico se puede alcanzar utilizando una modulación 64 QAM y una tasa de corrección de errores de 5/6. Incluso bajo condiciones no favorables, se pueden alcanzar altas tasas de transmisión utilizando técnicas como agrupación de antenas o multiplexación espacial.
- **Ancho de banda escalable:** su capa física le permite escalar la tasa de datos dependiendo del ancho de banda de canal disponible. Esta escalabilidad es soportada en el modo OFDMA, donde el tamaño de la FFT puede ser escalada en base al ancho de banda disponible.
- **Codificación y modulación adaptativa:** WiMAX soporta varios esquemas de modulación y tasas de codificación por usuario o por trama, dependiendo de las condiciones del canal. Este es un mecanismo efectivo que maximiza el caudal eficaz en un canal variante en el tiempo.
- **Soporta TDD o FDD:** la multiplexación se puede llevar a cabo en el tiempo o en la frecuencia. Utilizar FDD puede resultar en una implementación más económica. TDD ofrece ventajas debido a que se puede elegir el radio en los enlaces de bajada/subida, el diseño del transceptor es menos complejo (ya que se utiliza la misma frecuencia), entre otras.
- **OFDMA:** WiMAX móvil utiliza OFDM como técnica de acceso múltiple, lo que permite a diferentes usuarios ser colocados en diferentes subconjuntos de tonos OFDM.

- **Soporte de calidad de servicio:** La capa MAC de WiMAX tiene una arquitectura orientada a conexión, la cual soporta una gran variedad de aplicaciones, como es la voz y servicios multimedia. Este sistema permite hacer distinción entre el tráfico que es en tiempo real y el que no.
- **Soporte para movilidad:** La variante de WiMAX móvil tiene mecanismos para realizar el traspaso entre celdas (handover) de manera segura. El sistema también tiene mecanismos para el ahorro en el consumo de energía que extiende el tiempo de vida de las baterías de la terminal móvil.

II.1.1 OFDM.

OFDM pertenece a la familia de los esquemas de transmisión llamados modulación por subportadora, el cual está basado en la idea de dividir un flujo de bit a alta tasa de transmisión en varios flujos de baja tasa de bit paralelos en portadoras separadas (comúnmente llamadas subportadoras o tonos). Los esquemas de modulación multiportadoras eliminan o minimizan la interferencia intersimbólica (ISI) haciendo el tiempo de símbolo lo suficientemente grande de manera que los retardos inducidos por el canal son de duración insignificamente menor a la duración del símbolo [Andrews et al., 2007].

OFDM es una versión eficiente de la modulación multiportadora, donde las subportadoras son seleccionadas de tal manera que son ortogonales entre sí a lo largo de la duración del símbolo, de este modo se evita tener canales con subportadoras no traslapadas para evitar la interferencia entre subportadoras. Para esto, se selecciona la primer subportadora con una frecuencia que tenga un número entero de ciclos en un periodo de símbolo, y estableciendo el espaciamiento entre las subportadoras adyacentes (el ancho de banda de las subportadora) equivalente a:

$$B_{SC} = B/L \quad (1)$$

Donde B es el ancho de banda nominal (equivalente a la tasa de datos) y L es el número de subportadoras. Esto asegura que todos los tonos son ortogonales entre sí a lo largo del periodo del símbolo. Se puede demostrar que una señal OFDM es equivalente a la transformada discreta inversa de Fourier (IDFT) del bloque de datos. Esto hace extremadamente fácil de implementar transmisores y receptores OFDM en el tiempo discreto utilizando la transformada inversa rápida de Fourier (IFFT) y la transformada rápida de Fourier (FFT), respectivamente.

Para poder eliminar completamente la ISI, se usan intervalos de guarda entre los símbolos OFDM. Haciendo que el tiempo de guarda sea más grande que el esparcimiento multicamino del retardo esperado, se puede eliminar la ISI por completo. Sin embargo, añadir un intervalo de guarda implica desperdiciar potencia y disminuir la eficiencia del ancho de banda. La cantidad de potencia desperdiciada depende de que tan grande sea la fracción del símbolo OFDM que se utiliza para el tiempo de guarda.

El tamaño de la FFT en un diseño OFDM debe ser elegido cuidadosamente, para poder obtener un balance entre la protección contra las multitrayectorias, el desplazamiento Doppler, y el costo y complejidad del diseño. Para un dado ancho de banda, elegir un tamaño grande de la FFT podría reducir el espaciamiento entre subportadoras e incrementar el tiempo de símbolo. Esto lo hace más fácil para protegerlo contra el ensanchamiento del retardo multitrayectoria. Sin embargo, un espaciamiento reducido entre subportadoras, hace que el sistema sea más vulnerable a la interferencia intersimbólica debido al desplazamiento Doppler en aplicaciones móviles.

II.1.2 Ranura y estructura de la trama.

La capa física de WiMAX es la responsable de la asignación de ranuras y entramado. La unidad mínima de tiempo-frecuencia que puede ser asignada en un sistema WiMAX es llamada ranura. Cada ranura consiste de un subcanal en uno, dos o tres símbolos OFDM, dependiendo del esquema de subcanalización usada. Una serie contigua de ranuras asignadas a un dado usuario se llama región de datos del usuario; algoritmos de calendarización pueden asignar regiones de datos a diferentes usuarios, basados en la demanda, requerimientos de QoS, y condiciones del canal [Andrews et al., 2007].

Cuando se opera en TDD, la trama se divide en 2 subtramas: una de bajada seguida por una de subida, después de un pequeño tiempo de guarda (ver figura 2). El ratio de la subtrama bajada-subida varía de 3:1 a 1:1, para soportar diferentes perfiles de tráfico.

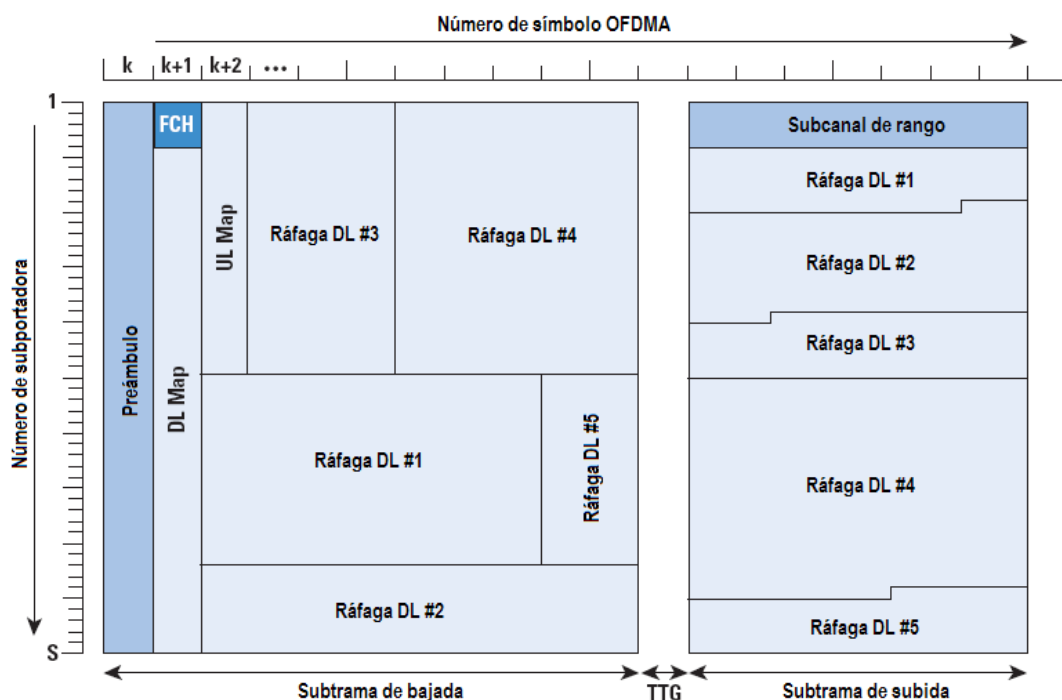


Figura 2. Estructura de la trama usando TDD en WiMAX.

II.2 Videoconferencia.

En los últimos años, el rendimiento, uso y confiabilidad del internet ha crecido. La introducción de las redes inalámbricas de banda ancha y las redes celulares, junto con el incremento en el poder de procesamiento de los nuevos dispositivos, han abierto la posibilidad de usar aplicaciones mucho más demandantes en recursos de procesamiento y acceso a la red de datos, como lo son las aplicaciones en tiempo real. Un ejemplo de estas es la videoconferencia. Los requerimientos para este tipo de aplicaciones son [Aune, 2004]:

- Adaptabilidad y cambio dinámico a las condiciones de tráfico en la red.
- Un buen desempeño en redes grandes y con un gran número de conexiones.
- Requerimiento de una baja latencia en de la red.
- Bajo requerimiento de encabezado por paquete.

Se puede definir a la videoconferencia como una sesión de audio y video, en tiempo real, con el fin de establecer la comunicación entre dos personas o grupos de personas.

Con la finalidad de combatir la pérdida de datos que afecte a la calidad de una sesión de videoconferencia, se hacen esfuerzos tanto en las tecnologías de comunicación como en la calidad del codificador de video. Por parte de WiMAX, se implementan mecanismos que permitan diferenciar entre el tráfico en tiempo real del que no lo es, y esto se hace por medio de la distinción en el encolamiento. El tráfico en tiempo real tiene mayor prioridad, con el fin de evitar retardos.

Por parte del codificador, se han desarrollado técnicas de compresión eficientes que permiten reducir la tasa de bit que genera sin degradar tanto la imagen. Uno de los codificadores actuales que ha tenido mucho auge es el codificador H.264.

Pero no solo el codificador y la tecnología empleada son factores que determinan la calidad en una videoconferencia, ya que la movilidad es otro elemento que hay que considerar. Si bien, desde hace tiempo es posible realizar llamadas telefónicas por medio de un celular en un vehículo en movimiento sin mayores problemas, hay que hacer notar la gran diferencia entre una llamada y una videollamada, y esta diferencia es, la cantidad de información que genera cada una. Mientras que el codificador de audio genera de 4 a 12 kbps⁷, en codificador de video genera de 50 a 550 kbps, por lo que el audio representa tan solo el 2% de lo que se genera con el video.

A continuación se presenta como el video es codificado con uno de los estándares mas utilizado en la actualidad, además se presenta una de las técnicas para evaluar la calidad de video en una forma teórica que indica que tan parecido es el video que se envía y como este fue recibido en el extremo destino.

II.2.1 H.264.

H.264 es un estándar de compresión de video. Este estándar define la manera en que la secuencia de video debe ser decodificada.

La compresión de video es posible gracias a que en una secuencia de imágenes puede existir redundancia espacial (figura 3) tanto como temporal, así como mecanismos de predicción [Richardson, 2003]. La redundancia espacial se refiere a que en una imagen pueden existir regiones donde la textura en la imagen no tenga grandes variaciones (ej. fondos lisos, como puede ser una pared blanca). La redundancia temporal indica que a lo

⁷ AMR, Adaptive Multi-Rate Speech Codec. <http://www.digitalpreservation.gov/formats/index.shtml>. Visitado el 31 de agosto de 2009.

largo del tiempo, un objeto se representa de la misma manera, es decir, no tuvo cambios (ej. no hubo movimiento en esa zona). En la figura 4 se muestran estas características.



Figura 3. Cuadro de un video (mostrando ejemplos de zonas homogéneas)

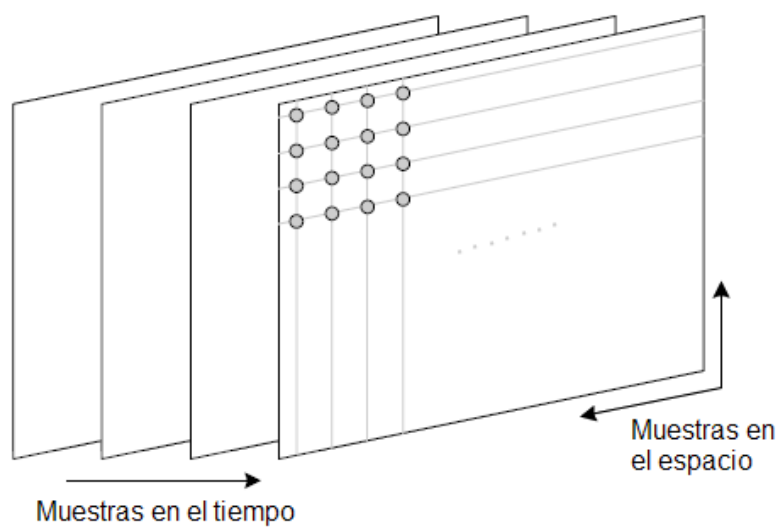


Figura 4. Muestras en el tiempo y en el espacio de una secuencia de video.

Una secuencia de video se encuentra definida por un grupo de imágenes (GOP). Un GOP especifica la manera en la que están ordenados los cuadros de video. Existen 5 tipos de cuadros, pero solo dos se utilizan en el perfil básico, el cual es el empleado en la videoconferencia [Richardson, 2003]. Estos cuadros son:

- Cuadro I. Es una imagen de referencia, la cual contiene la mayor parte de la información en un GOP y es independiente del resto.
- Cuadro P. Es un cuadro predictivo, el cual depende directamente de los cuadros I y sin estos no se puede decodificar.

Una vez que estos cuadros de información son transmitidos a través de una red de datos, estos pueden ser extraviados por procesos de congestión o retardos en la red y para poder medir cual fue el impacto de deterioro en la información de video en el extremo receptor, a continuación se introduce el concepto de PSNR y su uso como un indicador de la calidad del video recibido.

II.2.2 PSNR (Peak Signal to Noise Ratio).

La relación señal a ruido pico (PSNR) es una medida logarítmica, que depende del error cuadrático medio (MSE) entre la imagen original y la imagen reconstruida, relativo al cuadrado del valor más alto posible de la imagen (en bits)

$$PSNR_{dB} = 10 \log_{10} \frac{(2^n - 1)^2}{MSE} \quad (2)$$

La PSNR puede ser calculada fácil y rápidamente, es por eso que es una medida de calidad de imagen muy popular [Richardson, 2003], ampliamente usada para comparar la calidad de las imágenes comprimidas contra las descomprimidas. Sin embargo, tiene algunas

limitantes. Para hacer uso de esta medida, se requiere la imagen original y no se garantiza que ésta tenga una fidelidad perfecta. La figura 5 muestra un ejemplo con la imagen original y diferentes grados de distorsión.

Para una imagen o secuencia de imágenes dada, una alta PSNR normalmente indica alta calidad, mientras que una baja PSNR indica baja calidad. Sin embargo, un valor en particular de PSNR no necesariamente significa en lo absoluto calidad subjetiva.



Figura 5. Ejemplos de PSNR en una imagen. (a) Original. (b) 30.6 dB. (c) 28.3 dB



Figura 6. Imagen con el fondo borroso (PSNR = 27.7 dB)

Por ejemplo, en la figura 6, se muestra la imagen original comprimida, donde solo el fondo ha sido degradado. Esta imagen tiene 27 dB con respecto a la imagen original. Muchas personas podrán decir que se ve significativamente mejor debido a que el rostro es más claro, pero esto contradice la evaluación usando la PSNR, que indica que a mayor cantidad de PSNR, mejor será la imagen. Se considera que un valor entre 30 dB y 40 dB de PSNR es suficiente para decir que la imagen tiene buena calidad [Carlisle, 2007].

Evaluar un aspecto de apreciación numéricamente resulta complicado, ya que cada observador tiene diferente criterio. Sin embargo, la PSNR puede dar una idea concreta acerca de la calidad en imágenes. De esta forma, se puede evaluar un video a través de todas las secuencias de imágenes que lo conforman.

A continuación se presenta una introducción de CLD como base para el capítulo III donde se profundiza en este tema.

II.3 Cross-Layer Design.

En una arquitectura por capas, como lo es el modelo OSI, se dividen las tareas en capas y se define una jerarquía del servicio que ofrecerá cada capa. Estos servicios se llevan a cabo por medio de diversos protocolos en las diferentes capas. La arquitectura OSI prohíbe la comunicación directa entre capas no adyacentes; la comunicación entre capas adyacentes está limitada a un procedimiento de llamadas y respuestas.

Esta arquitectura por capas ha venido funcionando en sistemas inalámbricos, donde el problema principal no radica en el canal de comunicación. Sin embargo, cuando se habla de canales inalámbricos, existen muchos factores que en una fracción de segundo alteran las condiciones, lo que lo hace un canal cambiante con un comportamiento aleatorio.

Cross-Layer Design se puede considerar como un complemento al sistema convencional por capas, donde la principal característica es romper con el esquema establecido: la comunicación entre capas no adyacentes.

La justificación está, en que gracias a un diseño en el que capas no adyacentes se puedan comunicar, se pueden crear mecanismos que permitan compartir y utilizar la información de diferentes capas para realizar una optimización a un determinado sistema de comunicaciones. Parámetros que son desconocidos para una capa pueden ser de utilidad para otra capa, si se presentan de manera que los comprenda la capa no adyacente.

II.3.1 Aproximaciones.

Existen distintas aproximaciones de CLD, las cuales se pueden clasificar dependiendo de qué manera rompan las reglas de la arquitectura por capas. Estas pueden ser [Srivastava y Motani, 2005]:

- Creación de nuevas interfaces.
- Mezcla de capas adyacentes.
- Acoplar capas sin nuevas interfaces

Crear nuevas interfaces implica la comunicación directa entre capas no adyacentes, sin importar la dirección (de arriba hacia abajo o viceversa). Mezclar capas adyacentes es otra manera de implementar CLD, donde las funciones de dos capas se manejan como la función de una sola supercapa. Acoplar dos capas sin la necesidad de crear nuevas interfaces es otra manera de implementar CLD, lo cual se consigue modificando las funciones de una capa en particular para cambiar el modo en el que pueda operar otra capa.

La aproximación considerada en este trabajo es la creación una nueva interfaz, la cual se encargará de realizar las notificaciones hacia arriba (aplicación).

II.3.2 Arquitectura.

En los diversos trabajos basados en una optimización de CLD, se puede apreciar como el proceso se divide en 3 pasos:

- a) Abstracción de parámetros.
- b) Optimización.
- c) Distribución de decisiones (o proceso de reconfiguración).

El proceso de abstracción de parámetros es necesario debido a que los parámetros propios de una capa resultan inteligibles a otras capas (e.g. el esquema de modulación o tasa de codificación solo se entienden a nivel de capa física). Esta abstracción implica una transformación de datos de tal modo que un optimizador pueda operar con estos datos.

La optimización es un proceso donde se tiene como objetivo mejorar el desempeño en el proceso de comunicación. Este optimizador tiene como entradas parámetros abstraídos de diferentes capas, y entrega como salida parámetros obtenidos a partir de una función objetivo.

Por último, la distribución de decisiones se encarga de entregar los resultados obtenidos a partir de la optimización a la capa correspondiente, de tal manera que lo que le sea entregado sea completamente entendible para esa capa. Este resultado o decisión, es en teoría el valor o valores óptimos que reflejaran una mejora en el objetivo perseguido por el diseño.

II.4 Conclusiones del Capítulo II.

En este capítulo se presento un marco teórico que involucra todos los conceptos más relevantes relacionados con este trabajo. Los tres apartados previos de este capítulo muestran claramente los tres elementos claves: WiMAX, la tecnología empleada; la videoconferencia, aplicación sobre la cual se desea mejorar su desempeño; y Cross-Layer Design, la herramienta que permitirá realizar la mejora de transmisión de video a través de una red inalámbrica.

A continuación se presenta el capítulo III, en el cual se expone la solución a la transmisión de video móvil considerando velocidades vehiculares utilizando una red de acceso WiMAX.

Capítulo III

Diseño de Cross-Layer

III.1 Diseño de Cross-Layer propuesto.

El diseño de Cross-Layer que se propone en este trabajo, consta de los 3 procesos mencionados en el capítulo anterior:

- 1) Abstracción de parámetros
- 2) Optimización de Cross-Layer
- 3) Distribución de decisiones

El objetivo de esta propuesta, es hacer uso eficiente los recursos disponibles en el canal inalámbrico (tasa de bit ofrecida), de tal manera que la transmisión de la videoconferencia suceda de manera fluida y con la mejor calidad posible. Esto será posible si la aplicación conoce el esquema de modulación y tasa de codificación (que dependen directamente del estado del canal), y de esta manera modificar sus parámetros de tal manera que sus requerimientos puedan ser concedidos por el sistema de comunicación.

El proceso de abstracción de parámetros debe consistir de parámetros o datos que tengan relevancia en el objetivo que se persigue. Para el caso de estudio de este trabajo, los parámetros provienen tanto de la capa de aplicación (la videoconferencia) y la capa física (WiMAX).

La abstracción de estos parámetros va a permitir llevar a cabo la optimización. Cabe señalar que la información con la que trabaja el optimizador son parámetros abstraídos a partir de un conjunto de datos propios de la capa en cuestión (i.e. la capa de aplicación proporciona parámetros como resolución del video o cantidad de cuadros por segundo, en el proceso de abstracción se obtiene una tasa de bit). Este proceso de optimización lo lleva a cabo la denominada función objetivo, la cual opera con el conjunto de parámetros abstraídos. Esta función objetivo, tiene como propósito optimizar el funcionamiento que busca el diseño Cross-Layer. En este trabajo, se pretende que la función objetivo indique la configuración adecuada de la aplicación en base a las condiciones medidas en el canal radio.

Recordando que el objetivo que se persigue es que la aplicación se adapte a las condiciones del canal, la función objetivo opera en base a los parámetros abstraídos de la capa radio, en donde la forma de los parámetros abstraídos es una tasa de datos bruta que puede ofrecer en un determinado instante. El conjunto de parámetros abstraídos de la capa de aplicación indica la tasa de bit que genera la aplicación para cada una de las configuraciones disponibles, por lo que la toma de decisiones se basa en encontrar la configuración adecuada según las capacidades de transmisión en un momento dado.

En la distribución de decisiones se busca revertir el proceso de abstracción, de tal manera que se le notifique a la aplicación la configuración adecuada utilizando parámetros que se entienden a ese nivel (i.e. no la tasa de bit que genera, si no la configuración de la imagen que genera dicha determinada tasa de bit). La figura 7 presenta el diagrama de CLD de manera esquemática.

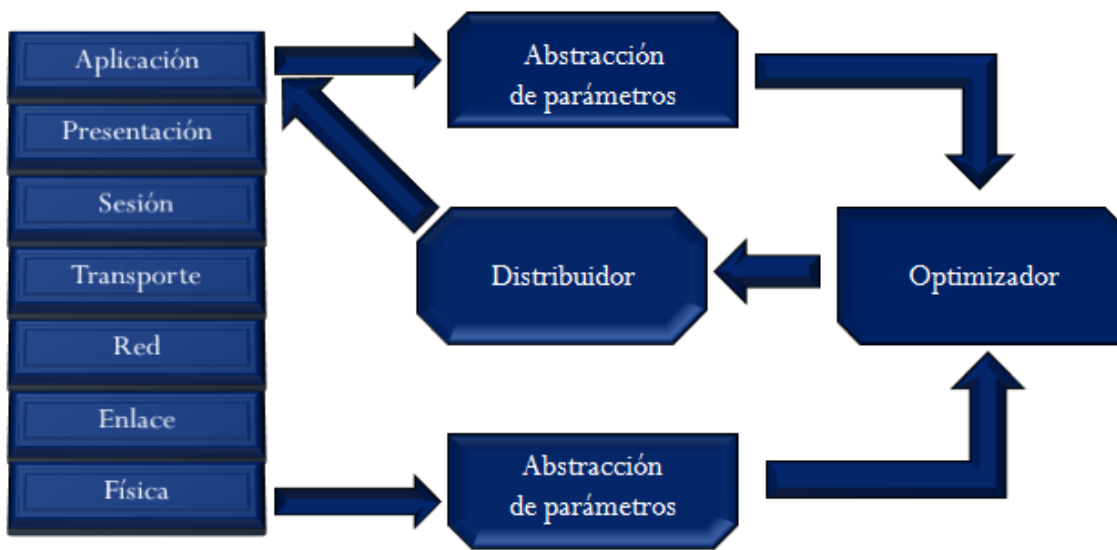


Figura 7. Esquema general del sistema CLD propuesto.

El objetivo de la abstracción de parámetros en la capa radio tiene como objetivo obtener la tasa de bit ofrecida por el canal.

Obtener la tasa de bit ofrecida por el canal en un momento determinado depende de varios factores, entre los cuales se pueden encontrar: la potencia de transmisión, la relación señal a ruido, la tasa de codificación, el esquema de modulación, entre otros. Todos estos datos pueden ser leídos directamente desde la capa radio, o bien, calcularlos a partir de otros.

En capítulos anteriores, se mencionó la importancia de minimizar la abstracción de parámetros, ya que impacta directamente en la complejidad y el tiempo de procesamiento en el sistema, lo que en ocasiones puede resultar contraproducente. Teniendo en cuenta lo anterior, se buscó una abstracción de parámetros que nos permitiera mantener el conjunto de la abstracción de parámetros pequeño, y que a su vez nos proporcionara la información que se necesita.

Hay dos elementos de los cuales depende directamente la tasa de bit ofrecida por el canal. Estos son el esquema de modulación y la tasa de codificación. Conociendo el esquema de modulación, se puede saber cuántos bits son enviados por símbolo; conociendo la tasa de codificación se puede saber cuál es la tasa de bit neta (el resto son bits de redundancia).

III.1.1 Abstracción de parámetros de la capa de aplicación.

El objetivo de la abstracción de parámetros de la capa de aplicación, es transformar los parámetros propios de esa capa en otros que puedan ser interpretados y manejados por otras capas.

Para lograr regular la tasa de bit generada por nuestra aplicación (para el caso de una videoconferencia), hay que manipular las configuraciones más significativas y que son de mayor impacto a la tasa de bit generada. Modificando la resolución de la imagen y la cantidad de cuadros, se puede impactar directamente sobre la cantidad de tráfico que se genera en bits.

Las dimensiones de la imagen (ancho y largo) no indican directamente cuanto se va a generar, debido a que la imagen va comprimida por algoritmos que dependen directamente del codificador empleado, que para este caso de estudio es el H.264. Esta compresión de imagen varía según el tipo de escena. Los tipos de escenas son una manera de clasificar y describir que es lo que está sucediendo en la secuencia de video.

Los tipos de escenas empleados en este trabajo de investigación fueron 3: Mother and Daughter, Carphone y Foreman.

En tipo de escena Mother and Daughter, el area de movimiento corresponde al de la mano de la madre, la cual se encuentra con su hija (ver figura 8a). En el tipo de escena Carphone, el interlocutor se encuentra dentro de un vehiculo en movimiento, donde se perciben movimientos faciales y de fondo. En el tipo de escena Foreman, se observa a un trabajador portando una cámara, en la cual se va filmando a él mismo mientras camina, por lo que hay movimiento en toda la escena.



Figura 8. Tipos de escena. a) Mother and Daughter, b) Carphone, c) Foreman

Estos tipos de escena, además de poder considerarse como escenas comunes, exponen que tanto tráfico genera el codificador. Es de esperarse que el tipo de escena Foreman fuese el que más le exigiera al codificador, lo cual resulto ser así.

La razón a lo anterior, resulta de la naturaleza misma de la imagen, donde un interlocutor se encuentra hablando, generando movimientos faciales, y además lleva consigo la cámara, lo que ocasiona movimiento en el fondo. El codificador H.264 utiliza codificación espacial y temporal. Esta codificación saca provecho de escenas donde hay poca actividad, lo cual no sucede en este tipo de escena.

Aunque nuestro tipo de escena elegido para este trabajo, genera mucha información, esto no significa que lo haga de manera constante. Si se toma una secuencia con una duración aproximada de 30 segundos, se puede ver como a lo largo del tiempo hay oscilaciones en

la cantidad de tráfico generado. Para poder observar el comportamiento del tráfico, fue necesario capturar los paquetes que genera la videoconferencia, por medio de un programa llamado Wireshark. Los resultados obtenidos se pueden apreciar en la figura 9.

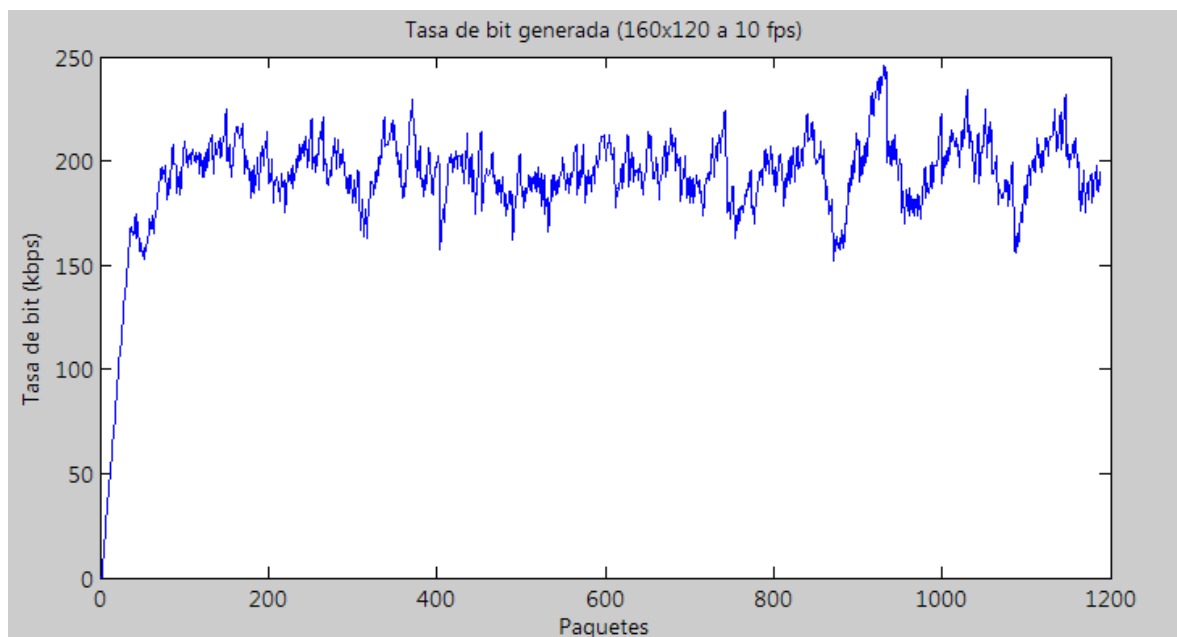


Figura 9. Tasa de bit generado en una configuración de 160x120 a 10 cuadros por seg.

El comportamiento de la gráfica anterior plantea una interrogante, ¿Cómo se va a considerar la cantidad de tráfico generado?, ¿Es ésta no es constante? En general, el tráfico generado oscila y, para este caso, la variación va desde los 150 hasta los 250 kbps, lo cual puede dar, en teoría, varias opciones. De tal forma que analizando cada una de estas posibilidades, se puede llegar a la conclusión de que la mejor manera de representar una configuración de video es considerando el máximo generado, y la razón es expuesta en el capítulo anterior, en el que se hizo mención de los cuadros que se manejan en el codificador de video H.264, el cual utiliza básicamente 2 tipos de cuadros: I y P. El cuadro I es el que contiene más información, y por ende, el que más genera tráfico, es indispensable para poder decodificar un cuadro P. Si se llegase a perder un cuadro I al no contar con la suficiente tasa de bit disponible, repercutiría directamente en la calidad del

video, lo cual sería contradictorio con el propósito de este trabajo. Por lo cual, la opción más viable es considerar el máximo pico de transmisión. La figura 10 muestra las diferentes tasas de transmisión generadas a diferentes cantidades de cuadros por segundo y ancho de resolución, obtenida mediante la medición de los diferentes formatos de imagen (resolución y cantidad de cuadros por segundo).

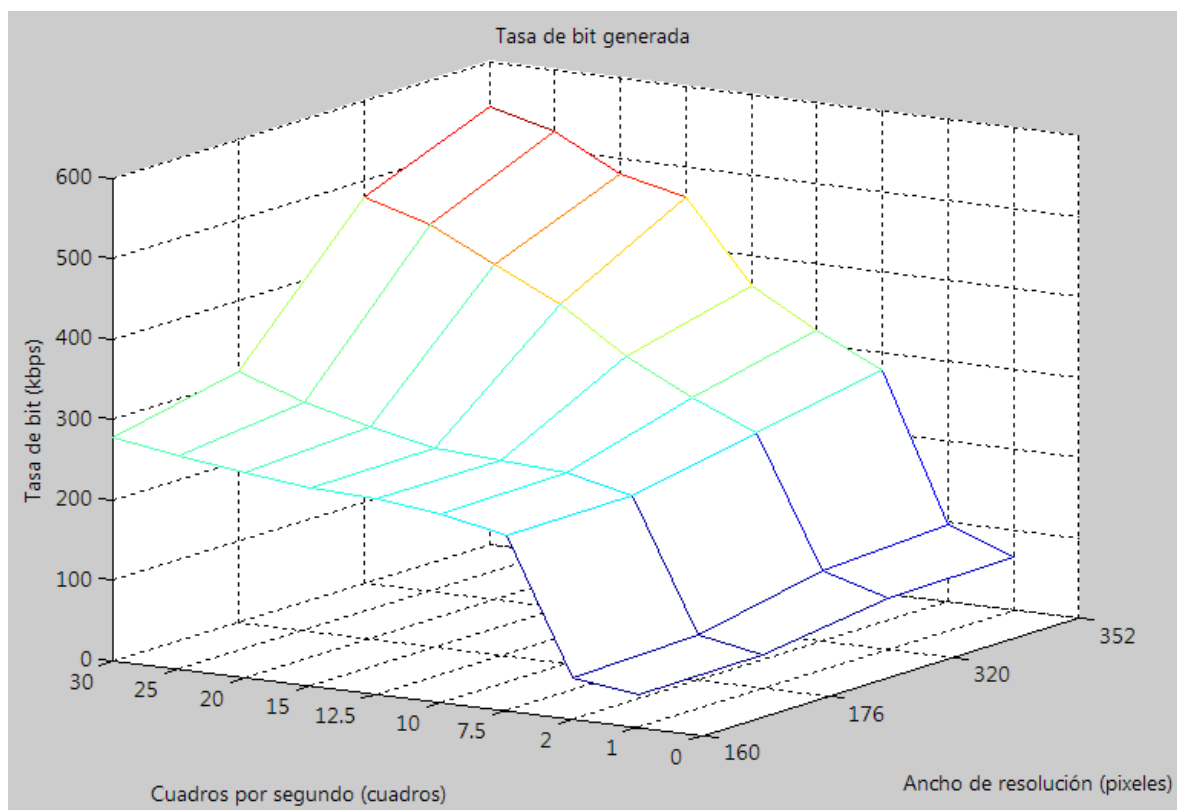


Figura 10. Tasa de bit generada por la aplicación de videoconferencia

En base a los resultados obtenidos, y como se reflejan en la figura anterior, se puede ver de qué manera impacta el incremento de la resolución de la imagen, así como la cantidad de cuadros por segundo empleados en una secuencia de video. Estos resultados reflejan que impacta de manera más significativa el incremento en la cantidad de cuadros por

segundo, más que la resolución de la imagen. Además, se puede determinar la cantidad mínima y máxima considerada en la abstracción de parámetros.

Para realizar la abstracción de datos en esta capa, fue necesario caracterizar las fuentes de tráfico (Anexo A). Por medio de esta caracterización, fue posible obtener el tráfico generado por la aplicación para las distintas configuraciones.

Para poder caracterizar las fuentes de tráfico, fue necesario emplear los datos obtenidos en las mediciones de tráfico generado por el video. Estos resultados se aproximaron a una función con el uso de una herramienta incluida en Matlab, llamada CFTool. Gracias a esta caracterización, fue posible obtener el comportamiento de nuestra fuente de tráfico, resultando ser de tipo exponencial (figura 11).

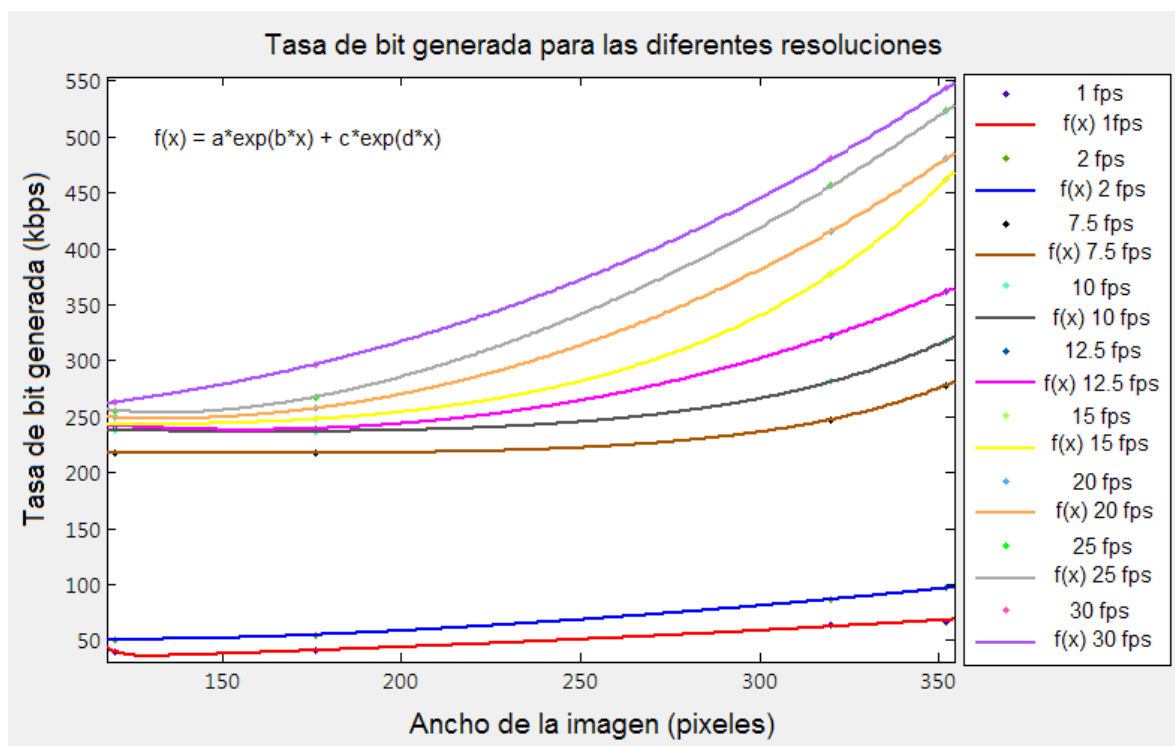


Figura 11. Tráfico generado por el codificador H.264 para las distintas resoluciones y cuadros por segundo.

III.1.2 Abstracción de parámetros de la capa de radio.

El propósito de la abstracción de parámetros de la capa de radio, tiene como propósito que el optimizador obtenga datos que sean entendibles y de utilidad para poder realizar el proceso de optimización.

En párrafos anteriores, se mencionó que en el proceso de abstracción de parámetros de la capa de aplicación se deseaba obtener una tasa de bit generada por la aplicación de videoconferencia, por lo que al optimizador le es de utilidad conocer la tasa de bit que ofrece la capa de radio en un momento dado, según las condiciones.

Se considera que, la implementación de esta tecnología lleva implícita la adaptación dinámica de la tasa de modulación y esquema de codificación. Sin embargo, esto por sí mismo no indica cual es la tasa de bit disponible.

Aún así, es posible conocer la tasa de bit disponible en base al esquema de modulación y tasa de codificación según la ecuación:

$$BR = CB_{sym} * NS_D * CR * S_{up} / T_{sym} \quad (3)$$

Donde BR es la tasa de bit disponible, CB_{sym} es la cantidad de bits codificados por símbolo OFDM (que depende del esquema de modulación), NS_D es la cantidad de subportadoras utilizadas para transmitir datos, CR es la tasa de codificación, S_{up} es la cantidad de símbolos OFDM empleados en la subida, y T_{sym} es la duración total de un símbolo OFDMA (donde incluye la subida y la bajada). Con esta ecuación se puede obtener la siguiente tabla [Andrews et al., 2007]:

Tabla II. Tasas de bit en el enlace de subida de WiMAX

Esquema de modulación	Tasa de codificación	Tasa de bit
QPSK	$\frac{1}{2}$	1.344 Mbps
	$\frac{3}{4}$	2.016 Mbps
16-QAM	$\frac{1}{2}$	2.688 Mbps
	$\frac{3}{4}$	4.032 Mbps
64-QAM	$\frac{1}{2}$	4.032 Mbps
	$\frac{3}{4}$	6.048 Mbps

Estas tasas de bits obtenidas (tabla II) representan la capacidad del enlace ascendente. No obstante, esta capacidad se reparte entre los diversos usuarios que comparten el enlace. Además, hay que considerar que el usuario puede estar utilizando los recursos de su enlace ascendente no sólo en la aplicación de videoconferencia, sino que puede estar también realizando descargas de datos o navegando en Internet, por lo que los recursos disponibles son aún menos. Por lo tanto, se considerara que solo el 10% de los recursos disponibles son utilizados para la videoconferencia, y el resto para otro tipo de tráfico y usuarios [Triantafyllopoulou et al., 2007].

El proceso de adaptación en la tasa de codificación y esquema de modulación se lleva a cabo mediante la detección de la SNR. Esta SNR debe garantizar que la tasa de bit errónea sea menos de 10^{-6} [IEEE, 2005] para cada configuración. Para obtener la SNR requerida para cada configuración de WiMAX, se realizó una simulación con la cual se obtuvieron una serie de curvas que muestran la respuesta de WiMAX ante distintas condiciones de SNR en el canal (ver figura 12):

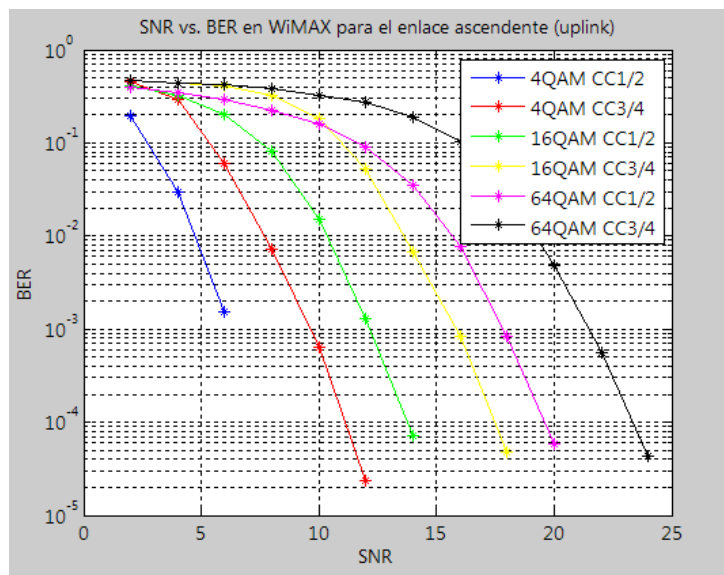


Figura 12. Relación de la SNR del canal y la BER generada

Para considerar que la transmisión es segura, se define en [IEEE, 2005] la máxima cantidad de BER permitida, la cual es de 10^{-6} . En las simulaciones realizadas, no es posible llegar a ese valor, siendo lo más cercano una BER de 10^{-5} usando una modulación de 4 QAM con una tasa de codificación de $\frac{3}{4}$. Sin embargo, esto es positivo, en el sentido de que es posible alcanzar una transmisión segura en el intervalo de 6 a 25 dB de SNR. Estas curvas muestran valores cercanos a los definidos en el estándar [IEEE, 2005] y a los de una simulación realizada en [Andrews et al., 2007].

III.1.3 Optimizador del diseño de Cross-Layer.

La función del optimizador de Cross-Layer es minimizar la diferencia entre la tasa de bit ofrecida y la cantidad de tráfico que genera la aplicación de videoconferencia. Es decir, se busca que:

$$Th_{of} > BR_{ap} \quad (4)$$

donde Th_{of} es la tasa de bit ofrecida por WiMAX y BR_{ap} es la tasa de bit generada por la aplicación.

Se menciona que se busca minimizar la diferencia, porque dada la expresión de arriba, existen (en la mayoría de los casos) más de un valor que satisfaga la expresión.

El optimizador busca dentro de una serie de valores de tasa de bit generada por la aplicación, resultado del proceso de abstracción, el más cercano y menor a la tasa de bit ofrecida.

III.2 Modelado matemático del diseño de Cross-Layer propuesto.

Esta sección está dedicada a la formalización matemática del diseño de Cross-Layer descrito en el apartado anterior.

III.2.1 Abstracción de parámetros.

El proceso de abstracción de parámetros es necesario para poder implementar y desarrollar el proceso de Cross-Layer, ya que, los parámetros de capa a capa solo tienen significado en la propia capa a la que pertenecen. Como ejemplo, parámetros como la potencia de la señal solo tienen significado a nivel de la capa física, a la cual pertenece este parámetro. Si se desea que otra capa realice algo en función de la detección de cierta cantidad de potencia, se tiene que realizar una abstracción de parámetros para poder interpretar el valor que entregue.

La abstracción de parámetros no debe ser para nada arbitraria, sino que por el contrario, tiene que ser en base al objetivo que se persigue. El resultado de esta abstracción alimentará directamente al optimizador Cross-Layer. De no realizar una abstracción de

parámetros adecuada, surgen problemas de compatibilidad, estabilidad en el sistema y exceso de señalización [Lai-U Choi, 2006].

III.2.1.1 Parámetros de la capa de radio.

Como se ha definido con anterioridad, la abstracción de parámetros en la capa de radio constará del esquema de modulación y tasa de codificación empleada, según la condición actual del canal.

Obteniendo el valor de BR descrito en la ecuación 3, se puede obtener el parámetro abstraído de la tasa de bit que ofrece el canal inalámbrico.

A partir de la formalización matemática definida por [Lai-U Choi, 2006], se define el conjunto:

$$R = \{r_1, r_2, \dots\} \quad (5)$$

Del cual se propone en este trabajo definir las tuplas $r_i = (M_i, C_i)$ de parámetros específicos de la capa de radio r_i para WiMAX, donde M es el esquema de modulación empleado y C es la tasa de codificación. Dado que estos parámetros pueden ser variables, el conjunto R contiene todas las combinaciones posibles y cada tupla r_i contiene una combinación.

Para formalizar la abstracción de parámetros, se define el conjunto:

$$\tilde{R} = \{\tilde{r}_1, \tilde{r}_2, \dots\} \quad (6)$$

de tuplas $\tilde{r}_i = \{Th_i\}$ de parámetros abstraídos, donde Th_i es la i -ésima tasa de bit ofrecida correspondiente al esquema de modulación y tasa de codificación empleados. La relación entre el conjunto R de todas las posibles tuplas de parámetros de la capa de radio y el conjunto \tilde{R} de todas las posibles tuplas de parámetros abstraídos de la capa de radio está definida por la relación

$$\mathbb{G} \subseteq R \times \tilde{R} \quad (7)$$

con dominio en R y codominio en \tilde{R} y donde el operador \times denota el producto cartesiano. Se establece que \mathbb{G} es una relación en la que sólo están incluidos todos los pares válidos (r_i, \tilde{r}_i) , es decir, se descartan los pares ordenados como (r_1, \tilde{r}_3) o (r_4, \tilde{r}_2) , y B es un subconjunto de $R \times \tilde{R}$. Se le llama al conjunto \mathbb{G} la abstracción de parámetros de la capa de radio.

Los pares ordenados que no son válidos, corresponden a combinaciones en la que el esquema de modulación y tasa de codificación no corresponden al valor de tasa de bit ofrecida. Es decir, se define que para una determinada combinación de esquema de modulación y tasa de codificación, corresponde uno y sólo un valor de tasa de bit ofrecida.

La cardinalidad del conjunto R es finita, debido a que está limitado a las combinaciones disponibles de modulación y codificación. Entonces, si consideramos que las tuplas del conjunto R para este trabajo son

$$\begin{aligned} r_1 &= \left(QPSK, \frac{1}{2} \right) \\ &\dots \\ r_6 &= \left(64QAM, \frac{3}{4} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

se puede determinar que la cardinalidad del conjunto es

$$|R| = 6 \quad (9)$$

III.2.1.2 Parámetros de la capa de aplicación.

De la misma forma en la que se definió el conjunto R para la capa de radio, definimos el conjunto

$$A = \{a_1, a_2, \dots\} \quad (10)$$

de tuplas $a_j = (fps_j, res_j)$ de parámetros específicos de la capa de aplicación, donde fps es la cantidad de cuadros por segundo de codificación del video y res es la resolución del video (dimensiones de ancho por alto de la imagen). Dado que estos parámetros pueden ser variables, el conjunto A contiene todas las combinaciones posibles de ellos, en donde cada tupla a_j representa una combinación.

Ademas, definimos el conjunto

$$\tilde{A} = \{\tilde{a}_1, \tilde{a}_2, \dots\} \quad (11)$$

de tuplas $\tilde{a}_j = (BR_j)$ de parámetros abstraídos, donde BR es la tasa de bit generada por la aplicación. La relación que existe entre el conjunto A de todas las posibles tuplas de parámetros de la capa de aplicación y el conjunto \tilde{A} de todas las posibles tuplas de parámetros abstraídos de la capa de aplicación está definida por

$$\mathbb{F} \subseteq A \times \tilde{A} \quad (12)$$

con dominio en A y codominio en \tilde{A} , y donde el operador \times denota el producto cartesiano. Se establece que \mathbb{F} es una relación en la que sólo están incluidos todos los pares válidos (a_j, \tilde{a}_j) , y que además, \mathbb{F} es una función biyectiva. Llamamos al conjunto \mathbb{F} la abstracción de parámetros de la capa de aplicación.

La cardinalidad del conjunto A se puede definir de manera explícita debido a que todos los elementos de las tuplas a_j toman valores discretos. Si consideramos nueve tasas de cuadros por segundo y cuatros formatos de resolución, entonces las tuplas del conjunto A son

$$\begin{aligned}
 a_1 &= (160x120, 1 \text{ fps}) \\
 a_2 &= (160x120, 2 \text{ fps}) \\
 &\dots \\
 a_{35} &= (352x288, 25 \text{ fps}) \\
 a_{36} &= (352x288, 30 \text{ fps})
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

de tal manera que es posible determinar que la cardinalidad del conjunto es

$$|A| = 36 \tag{14}$$

III.2.1.3 Parámetros de Cross-Layer.

Los conjuntos de parámetros abstraídos \tilde{R} y \tilde{A} de la capa de radio y aplicación, respectivamente, son la entrada del optimizador de Cross-Layer. En este caso, cualquier combinación de las tuplas de parámetros abstraídos es válida, por lo que es conveniente definir el conjunto

$$\tilde{X} = \tilde{R} \times \tilde{A} \tag{15}$$

que integra los dos conjuntos de entrada del optimizador en uno solo, y que está compuesto de las tuplas $\tilde{x}_n = (\tilde{r}_i, \tilde{a}_j)$. En este punto, es cuando la cardinalidad de los conjuntos de parámetros abstraídos toma importancia, debido a que la cantidad de elementos del conjunto \tilde{X} crece exponencialmente respecto al número de parámetros de Cross-Layer. Ya se ha mencionado que el desempeño del optimizador Cross-Layer se ve afectado cuando el número de elementos abstraídos es grande, por lo que el número de parámetros abstraídos debe mantenerse tan bajo como sea posible.

La función objetivo se encarga de tomar una decisión respecto a las tuplas que conforman el conjunto \tilde{X} y puede darse el caso de que el valor que optimiza la función tenga que ser encontrado mediante una búsqueda exhaustiva, i.e. elemento por elemento. Lo anterior implica que los tiempos de respuesta del diseño Cross-Layer pudieran llegar a ser grandes, lo cual es un problema en aplicaciones sensibles al retardo. A continuación se presenta la propuesta de optimización a partir de los parámetros abstraídos de las capas de radio y aplicación.

III.2.2 Optimizador de Cross-Layer.

Dada la definición del conjunto A , redefinimos

$$\tilde{A} = \{\tilde{a}_1, \tilde{a}_2, \dots, \tilde{a}_{m-1}, \tilde{a}_m\} \quad (16)$$

de tal forma que

$$\tilde{a}_m > \tilde{a}_{m-1} \quad (17)$$

para todo valor de m , y reescribimos el conjunto \tilde{R} como

$$\tilde{R} = \{r_1, r_2, \dots, \tilde{r}_{n-1}, \tilde{r}_n\} \quad (18)$$

aclarando que

$$|\tilde{R}| \neq |\tilde{A}| \quad (19)$$

por lo que $m \neq n$.

Definimos la operación Ω que realiza el optimizador de Cross-Layer

$$\Omega: \tilde{X} \rightarrow \tilde{Y} \subset \tilde{X} \quad (20)$$

El optimizador tiene como entradas todas las posibles tuplas de parámetros abstraídos de Cross-Layer y tiene como salida el conjunto no vacío \tilde{Y} . Al ser \tilde{Y} el resultado del proceso de optimización, se puede definir que

$$\tilde{Y} = \{\tilde{x}_{\text{opt}}\} \in \tilde{X} \quad (21)$$

por lo que

$$|\tilde{Y}| = 1 \quad (22)$$

III.2.2.1 Función objetivo.

La salida del optimizador de Cross-Layer resulta en una \tilde{x}_{opt} , la cual es el resultado de una función objetivo

$$K : \tilde{X} \rightarrow \mathbb{R} \quad (23)$$

donde \mathbb{R} es el conjunto de los números reales y con regla de correspondencia

$$K(\tilde{x}) = \begin{cases} \tilde{a}_j & \text{si } \tilde{r}_i \geq \tilde{a}_j \geq \tilde{r}_{i-1} \\ \tilde{a}_{j+n} & \text{si } \tilde{r}_i > \tilde{a}_j, \quad \tilde{a}_{j+n} | \tilde{r}_i > \tilde{a}_{j+n} > \tilde{r}_{i-1} \\ \tilde{a}_{j-n} & \text{si } \tilde{a}_j > \tilde{r}_i, \quad \tilde{a}_{j-n} | \tilde{r}_i > \tilde{a}_{j-n} \geq \tilde{r}_{i-1} \geq \tilde{a}_{min} \end{cases} \quad (24)$$

donde \tilde{a}_j es el parámetro abstraído de la capa de aplicación que representa la tasa de bit generada actualmente por la aplicación, \tilde{r}_i es el parámetro de la capa de radio que representa la tasa de bit ofrecida actualmente, \tilde{a}_{min} es el parámetro abstraído de la capa de aplicación que representa la mínima tasa de bit que puede generar la aplicación, tanto \tilde{a}_{j+n} como \tilde{a}_{j-n} representan un parámetro abstraído de la capa de aplicación que garantizan una diferencia mínima positiva entre la tasa de bit ofrecida actualmente y la tasa de bit generada por la aplicación.

En este punto de la optimización, es importante que los conjuntos de parámetros abstraídos de la capa de radio y aplicación estén ordenados de manera ascendente, debido a que la búsqueda se realiza en base a un movimiento positivo (o incremental) dentro de los conjuntos en caso de que la diferencia no sea la mínima. Será entonces necesario, que de manera interna, el optimizador sea capaz de recordar el estado anterior, en caso de que la diferencia actual resulte negativa. Lo anterior, debido a que la configuración de la aplicación elegida en ese instante genere más tráfico del que se pueda ofrecer.

El optimizador, además es capaz de identificar el caso cuando \tilde{a}_{j-n} no cumple la condición establecida, en el caso de que \tilde{a}_{j-n} alcance el estado \tilde{a}_{min} , gracias a que conoce la cardinalidad del conjunto.

III.2.3 Distribución de decisiones.

El proceso de distribución de decisiones es el encargado de notificar a la capa de aplicación la decisión tomada por el optimizador de Cross-Layer. La salida del optimizador

$$\tilde{x}_{opt} = (\tilde{r}_{opt}, \tilde{a}_{opt}) \quad (25)$$

debe ser señalizada a las capas correspondientes. El parámetro \tilde{r}_{opt} representa a \tilde{r}_i , la cual es la tasa de bit estimada que ofrece el canal, la cual en ningún momento fue alterada en el proceso de optimización. \tilde{a}_{opt} , la cual representa la \tilde{a}_j obtenida en el proceso de optimización, es la que debe ser notificada a la capa de aplicación.

La tupla $\tilde{a}_{opt} \in \tilde{A}$ debe ser notificada a la capa de aplicación, por lo que la abstracción de parámetros debe ser revertida para que \tilde{a}_{opt} se convierta en a_{opt} . Dicha transformación está dada por

$$a_{opt} \in \{a \mid (a, \tilde{a}_{opt}) \in \mathbb{F}\} \quad (26)$$

El valor de a que corresponde a \tilde{a}_{opt} es único y está definido, debido a que la función \mathbb{F} es biyectiva, es decir, que para cada valor del conjunto a le uno y solo un valor del conjunto \tilde{a} , y viceversa.

III.3 Conclusiones del Capítulo III.

En este capítulo se describieron las herramientas que permitirán alcanzar el objetivo general planteado. Se definió la propuesta de Cross-Layer Design, y como se involucran los elementos descritos en el capítulo anterior.

Fueron descritos con formalidad cada uno de los módulos de Cross-Layer Design: la abstracción de parámetros, la optimización y la distribución de decisiones. La abstracción de parámetros involucra los conceptos de WiMAX y videoconferencia; la optimización permite encontrar la configuración idónea de la aplicación; mientras que la distribución de decisiones permite realizar la adaptación que permitirán mejorar los parámetros de QoS.

Capítulo IV

Resultados de la simulación y análisis numéricos

En este capítulo se muestran los resultados de las simulaciones realizadas para evaluar la propuesta Cross-Layer descrita en el capítulo anterior. También se lleva a cabo un análisis gráfico y numérico que permite medir el desempeño de la propuesta.

Las pérdidas de datos se consideran de manera empírica, que es cuando la tasa de bit generada rebasa la tasa de bit proporcionada. En base a esto, se analiza numéricamente como impactan las pérdidas en la calidad de la imagen y el grado de distorsión que originan tales pérdidas.

IV.1 Consideraciones de simulación.

Simular el canal inalámbrico resulta una tarea muy compleja [Olivares Domínguez, 2008]. En ambientes urbanos, al no tener LOS, se presenta el fenómeno de multitrayectorias. Estas multitrayectorias afectan a la señal de interés degradándola⁸, a manera de desvanecimientos a pequeña y gran escala.

Existen modelos de canal tanto empíricos como teóricos que describen el comportamiento del canal en distintos ambientes (desde rurales hasta densamente urbanos). Un parámetro importante dentro de estos modelos de canal, es la frecuencia de

⁸ Las multitrayectorias pueden afectar a la señal no solo de manera negativa, si no en ocasiones puede ser de manera positiva.

la señal. Modelos de canal como el COST 231 es aplicable en entornos urbanos, sin embargo, el intervalo de frecuencias para el cual está diseñado llega sólo a los 2 GHz. En este trabajo se considera que la frecuencia de la señal está situado en los 3.3 GHz, debido a que esta banda se asignará para el uso de redes estatales de educación, salud y gobierno [Garza-Cantú, 2009].

Dado que el enfoque de este trabajo se encuentra en la adaptación dinámica de parámetros de QoS, lo más importante es saber cómo funciona la adaptación de la aplicación de videoconferencia en base al diseño Cross-Layer, sean cuales sean las condiciones del canal. Es decir, no importa tanto analizar si el canal degrado mucho o poco la señal, ya que en un principio se estableció que la tecnología de WiMAX lidiará directamente con este problema, por medio de la adaptación dinámica de sus esquemas de modulación y tasas de codificación. Es por eso, que se proponen distintos comportamientos de canal, que ponen a prueba de distintas formas al diseño propuesto. Aún así, se considero el caso y uso de un modelo de canal con ruido aditivo blanco gaussiano (AWGN), multitrayectorias y efecto doppler, según las condiciones de simulación del trabajo de [Alim et al, 2008], donde define un canal con estas condiciones para un sistema basado en WiMAX.

A pesar de no considerar un modelo de canal en concreto, resulta importante tomar algunos parámetros que se presentan en el modelado del canal. El factor movilidad afecta al canal de una manera interesante e importante. Considerar que el dispositivo móvil se está desplazando a una velocidad vehicular, implica que el canal varíe de manera más rápida, que a una velocidad pedestre. Al tiempo en el que el canal se puede asumir como quasi-estacionario se le conoce como tiempo de decorrelación, el cual está definido por [Olivares Domínguez, 2008]

$$T_{dec} = 0.4 * \left(\frac{\lambda}{v} \right) \quad (27)$$

donde λ es la longitud de onda de la señal transmitida y v es la velocidad del dispositivo móvil, que en este caso equivale a 120 km/hr. Si

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (28)$$

donde f es la frecuencia de la señal (3.3 GHz), c es la velocidad de la luz y λ es la longitud de onda de la señal, se puede sustituir en la ecuación 27 de manera que

$$T_{dec} = 0.4 * \left(\frac{c}{\lambda v} \right) \quad (29)$$

se obtiene el tiempo de decorrelación equivalente a 0.0011 segundos. A pesar de que no se sigue un comportamiento de un modelo de canal establecido, utilizamos el tiempo de decorrelación para dictar los cambios que sucedan en el canal. La trascendencia de este tiempo de decorrelación se encuentra en que la aplicación debe tratar de responder a los cambios en ese mismo tiempo. Sin embargo, los tiempos que se manejan a nivel de aplicación son distintos y mayores.

En el capítulo II se hizo mención del GOP, el cual es un grupo de imágenes que definen una secuencia de video. Si se toma una tasa de 30 cuadros por segundo, el GOP está constituido por 15 cuadros [Choi, 2006], por lo que cada GOP dura 0.5 segundos. Debido a que el tiempo del GOP es mayor que el tiempo de decorrelación, definimos el tiempo de respuesta como

$$t_{ans} = \sum_{k=1}^m kT_{GOP} \quad (30)$$

donde T_{ans} es el tiempo de respuesta de la aplicación y T_{GOP} es el tiempo que dura un GOP.

El límite m es variable, y depende directamente de las condiciones establecidas en la ecuación 24, la cual es la función objetivo.

Las transmisiones de video tienen una duración de 10 segundos, lo cual se considera como tiempo suficiente de simulación.

IV.2 Resultados de las simulaciones.

IV.2.1 Análisis de pérdidas de paquetes de datos.

Las simulaciones se llevaron a cabo de dos modos: primero se simuló el envío de video a una tasa de bit sin adaptaciones, es decir, la aplicación no varía sus parámetros independientemente si el canal cambia o no; después se simula el envío del mismo tren de datos pero con la adaptación propuesta.

Ya que el canal rige la manera en que se va a llevar a cabo la modulación y codificación, se simuló un canal dispersivo, con una frecuencia doppler de 366 Hz^9 , el cual se observa en la figura 13.

⁹Frecuencia doppler correspondiente a una velocidad de 120 km/hr.

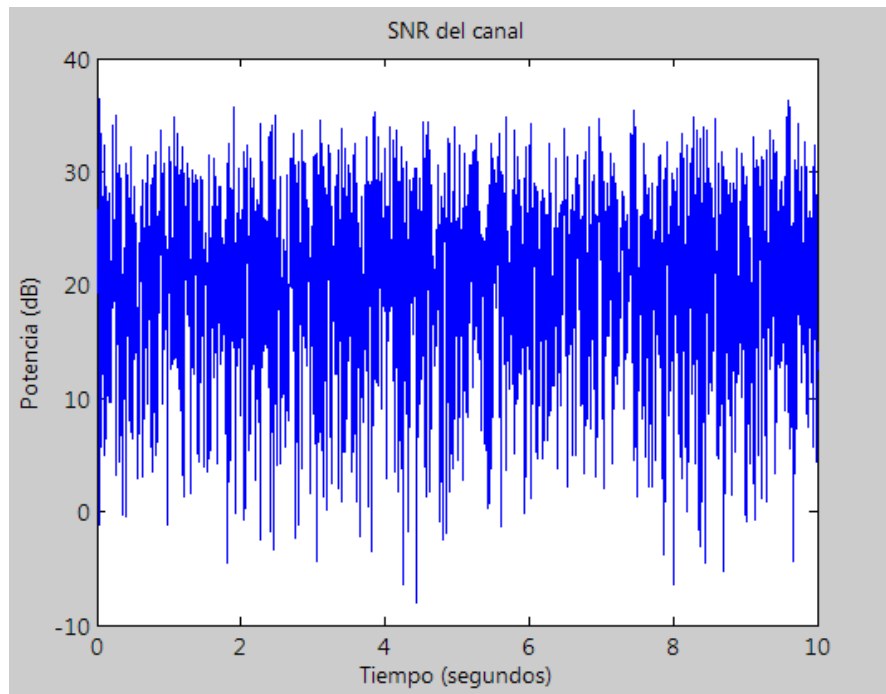


Figura 13. SNR del canal a lo largo de 10 seg. con una frecuencia doppler de 366 Hz.

Si dado el canal anterior, se simula en el envío de datos a una tasa de 500 kbps, la figura 14 muestra como se presentan pérdidas. Pero si sobre el mismo canal se simula el envío de datos a una tasa variable debido a la implementación de la propuesta CLD, según las condiciones del canal, se obtienen pérdidas como las mostradas en la figura 15.

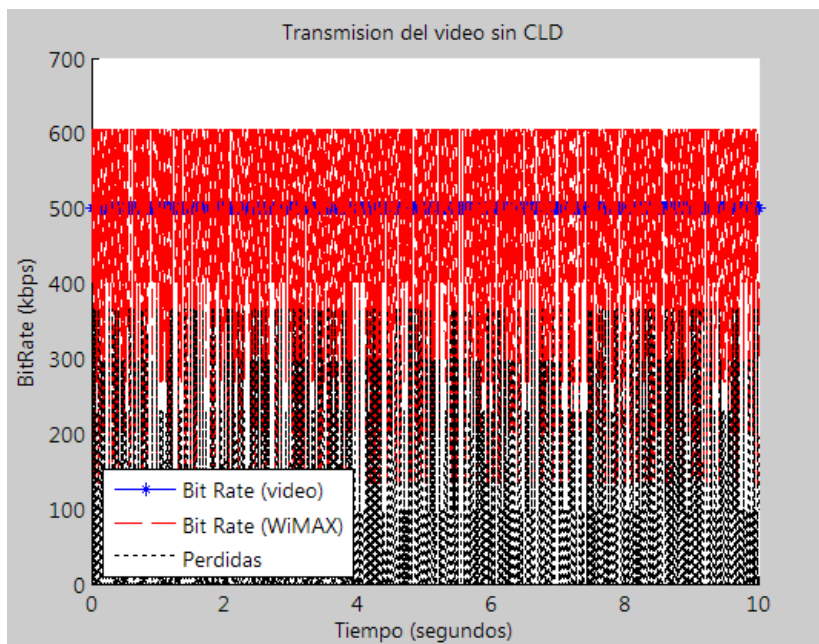


Figura 14. Transmisión de video sin CLD en un canal inalámbrico dispersivo.

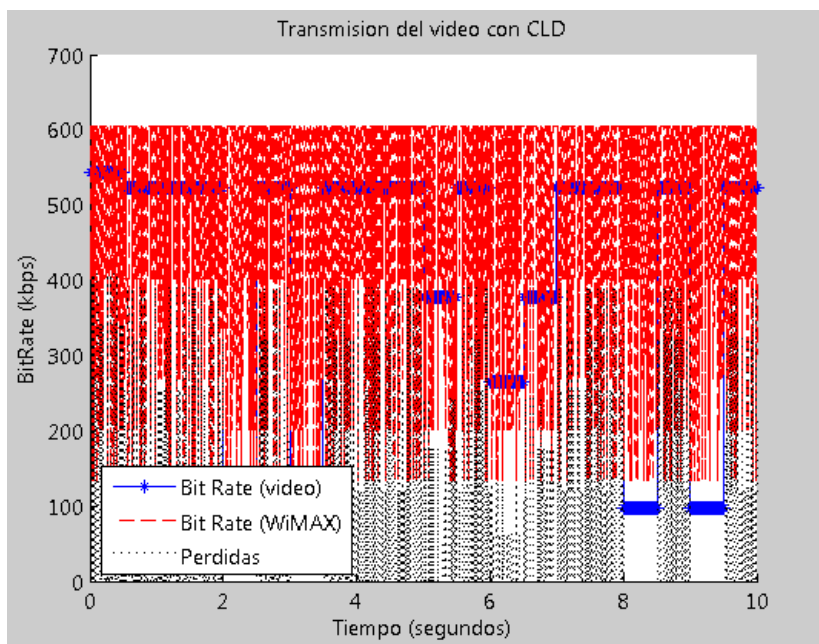


Figura 15. Transmisión de video con CLD en un canal inalámbrico dispersivo.

Desafortunadamente, gráficamente no se puede observar con claridad este comportamiento, debido a los cambios bruscos, rápidos y constantes. Se sabe que están sucediendo cambios en el canal, que la tasa de bit varia, y en el caso de la adaptación Cross-Layer, se sabe que el mecanismo está adaptando para hacer que la aplicación genera la cantidad de tráfico conveniente, pero no se puede analizar gráficamente. Con el fin de que el experimento arroje resultados más claros, tanto numérica como gráficamente, se propusieron 3 perfiles de canal: un decaimiento lento de SNR (figura 16), decaimiento y recuperación abruptos de SNR (figura 19) y cambios lentos en la SNR (figura 22).

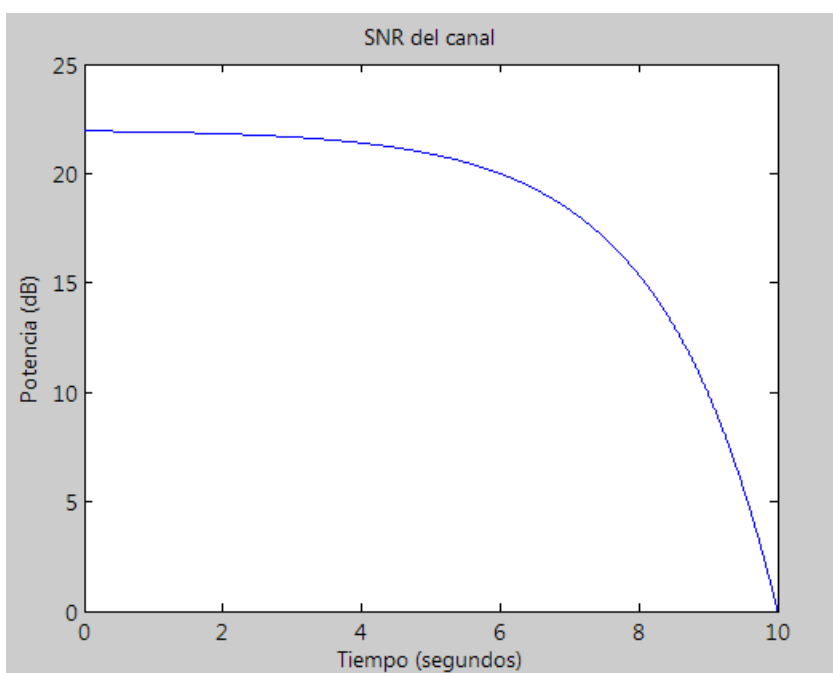


Figura 16. SNR de un canal inalámbrico (decaimiento lento)

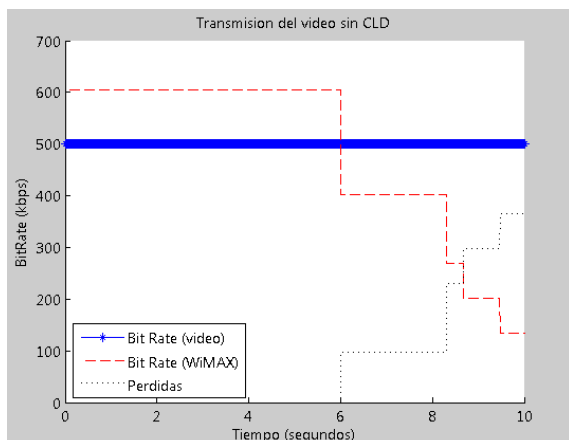


Figura 17. Transmisión de video sin CLD en un canal inalámbrico con decaimiento lento.

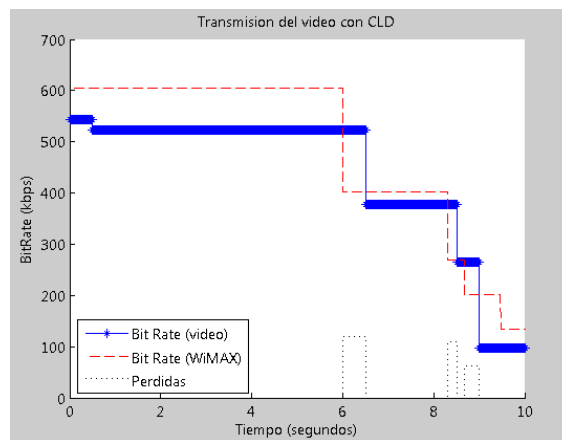


Figura 18. Transmisión del video con CLD en un canal inalámbrico con decaimiento lento.

Los resultados obtenidos muestran un comportamiento de ajuste de los parámetros de capa de aplicación que se adaptan en forma escalonada debido a los cambios en el esquema de codificación de la capa de radio en WiMAX. Se aprecia también como las pérdidas que experimenta el sistema empleando CLD (figura 17) son reducidas en comparación con el esquema sin CLD (figura 18).

En la literatura consultada, no se encuentran mediciones comparando una propuesta CLD contra el hecho de no usarla. Sin embargo, esta comparativa resulta útil ya que proporciona información acerca de que tanto se pueden disminuir las pérdidas si se considera una adaptación dinámica.

Tabla III. Comparación de pérdidas sin y con CLD en un canal con decaimiento lento.

	Kilobits enviados	Kilobits perdidos	% de pérdidas
Sin CLD	5,000	737.470	14.749
Con CLD	4399.744	100.952	2.294

La tabla IV muestra una comparación numérica del comportamiento del experimento, donde se aprecia como las pérdidas son disminuidas significativamente, ya que de ser cerca del 15% de pérdidas de información, con la propuesta Cross-Layer tan solo se pierde el 2.2%.

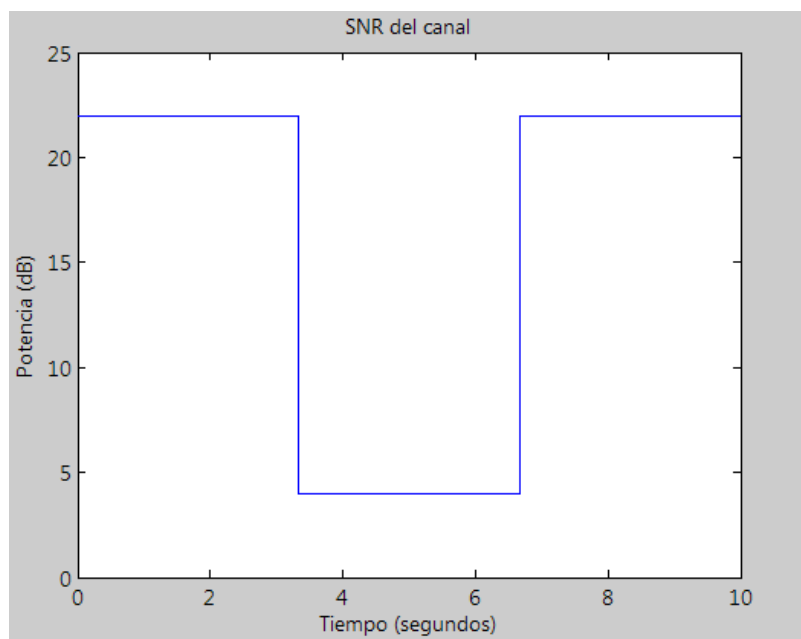


Figura 19. SNR de un canal inalámbrico (decaimiento y recuperación abruptos)

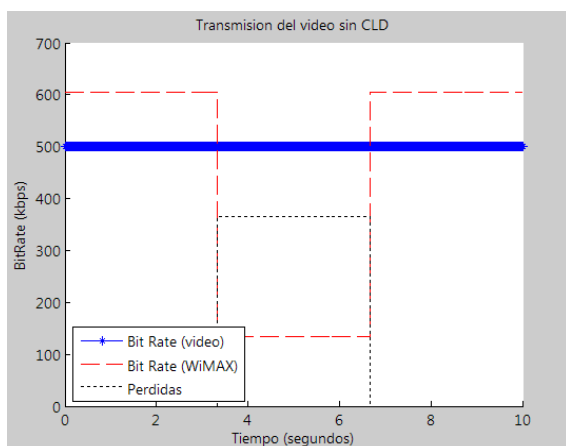


Figura 20. Transmisión de video sin CLD en un canal inalámbrico con decaimiento y recuperación abruptos.

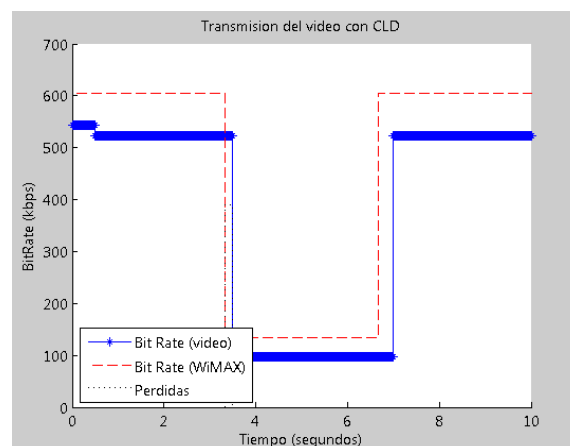


Figura 21. Transmisión del video con CLD en un canal inalámbrico con decaimiento y recuperación abruptos.

El segundo caso muestra un canal inalámbrico con cambios abruptos en la cantidad de SNR medida (figura 19). De forma similar que en el caso anterior, se aprecia como el uso del mecanismo CLD (figura 21) ajusta los parámetros de manera que se mejora de una manera significativa, pasando de un 24% en pérdidas a un 1.7%, lo cual se puede observar en la tabla IV. Es de notarse como en un canal con este comportamiento en particular produce aun más pérdidas sin una adaptación (figura 20), y menos pérdidas que en el caso de la adaptación del caso anterior.

Tabla IV. Comparación de pérdidas sin y con CLD en un canal con decaimiento y recuperación abruptos.

	Kilobits enviados	Kilobits perdidos	% de pérdidas
Sin CLD	5,000	1,218.667	24.373
Con CLD	3,751.226	65.757	1.753

La figura 22 muestra el comportamiento del sistema ante una forma cambiante en el canal inalámbrico con fluctuaciones abruptas y lentas.

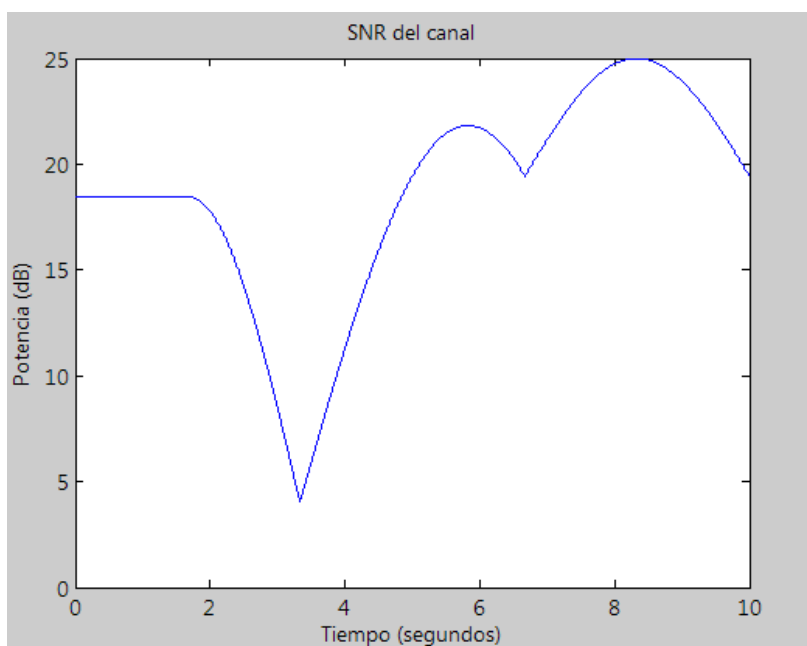


Figura 22. SNR de un canal inalámbrico (cambios lentos)

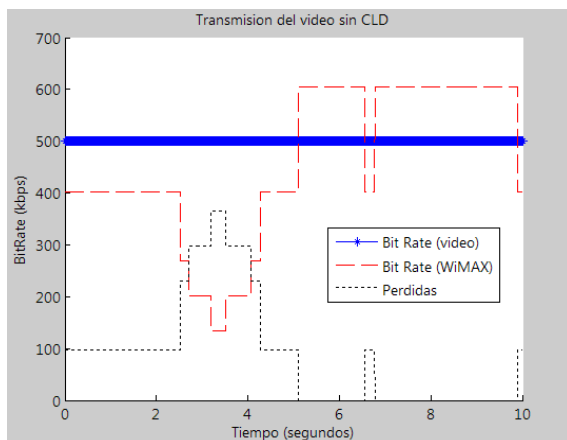


Figura 23. Transmisión de video sin CLD en un canal inalámbrico con cambios lentos

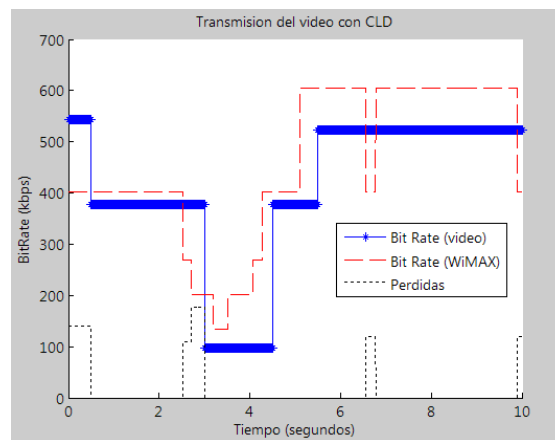


Figura 24. Transmisión del video con CLD en un canal inalámbrico con cambios lentos

Los resultados obtenidos comprueban el funcionamiento del mecanismo de CLD (figura 24) propuesto que intenta adaptar los parámetros y así mejorar la QoS ante los cambios en la tasa de transmisión provocados por cambios en el canal inalámbrico. En la tabla V se puede ver que la diferencia entre usar y no usar CLD es más del 10% en pérdidas, al igual que en los casos anteriores.

Tabla V. Comparación de pérdidas sin y con CLD en un canal con cambios lentos.

	Kilobits enviados	Kilobits perdidos	% de pérdidas
Sin CLD	5,000	873.709	17.474
Con CLD	4,094.687	179.676	4.388

El análisis numérico en pérdidas de paquetes permite ver como hay una mejora significativa cuando se utiliza la propuesta CLD, superando una diferencia en todos los casos propuestos en un 10% de pérdidas. Además, gráficamente es posible ver como las pérdidas disminuyen debido a la adaptación CLD.

IV.2.2 Análisis de distorsión de la imagen.

Para evaluar el desempeño del diseño propuesto se propone analizarlo de manera cualitativa. El uso de la PSNR permitirá evaluar y obtener un indicador, no la calidad la imagen por si misma, si no la comparación de la imagen original enviada con la imagen decodificada recibida. Si bien, en algún momento determinado el codificador se ve en la necesidad de emplear una calidad baja, la idea es que por lo menos no disminuya aun más la calidad en el extremo receptor.

Se ha establecido en el capítulo II, que la PSNR se puede obtener por medio de la ecuación 2. Sin embargo, un parámetro que no se definió fue el de MSE, que es el error cuadrático medio.

El error cuadrático medio entre la imagen original y la recibida se define como [Choi, 2006]

$$MSE = MSE_s + MSE_L \quad (31)$$

Donde MSE_s es el error cuadrático medio producido por la fuente (codificador) y MSE_L es el error cuadrático medio originado por pérdidas en la transmisión, el cual se describe como

$$MSE_L = \sum_{i=1}^n D_i P_i \quad (32)$$

donde P_i es la probabilidad de que el i -ésimo cuadro sea el que se pierda durante la transmisión de un GOP, y D_i es el error cuadrático medio que es inducido por la pérdida de ese cuadro. Simular las pérdidas producidas por la codificación en la compresión de video resulta altamente complejo, ya que no solo depende de la imagen que se esté mostrando en un momento determinado, sino que también depende de los recursos de la

computadora, por lo que estas pérdidas no se tomarán en cuenta para este estudio, considerando que si existiesen, afectaría de igual manera con la implementación de CLD y sin ella.

Para obtener la distorsión generada por la pérdida de algún cuadro dentro del GOP, se utilizaron los resultados obtenidos en el trabajo de [Choi et al., 2006], los cuales se muestran en la figura 19, donde el índice i representa el número de cuadro dentro de un GOP, y la distorsión representa la cantidad de MSE que se genera con la pérdida de ese cuadro.

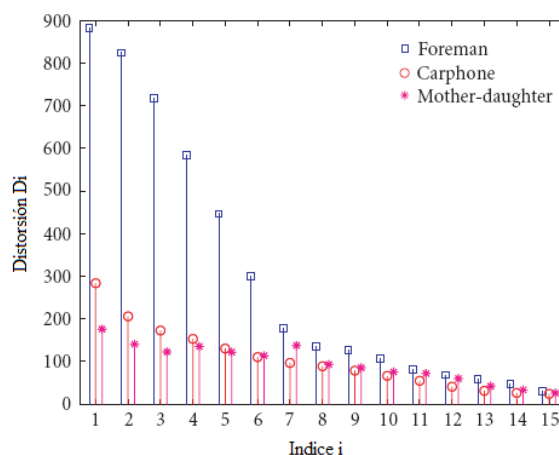


Figura 25. Distorsión generada en la imagen dentro de un GOP según el cuadro perdido.

Siguiendo los últimos 3 casos del análisis anterior, se puede medir la PSNR usando los criterios para evaluar según lo descrito en el subcapítulo II.2.2. Esto se puede calcular midiendo en el tiempo cual es el cuadro que se pierde en determinado momento. En base a esto, se obtienen los siguientes resultados:

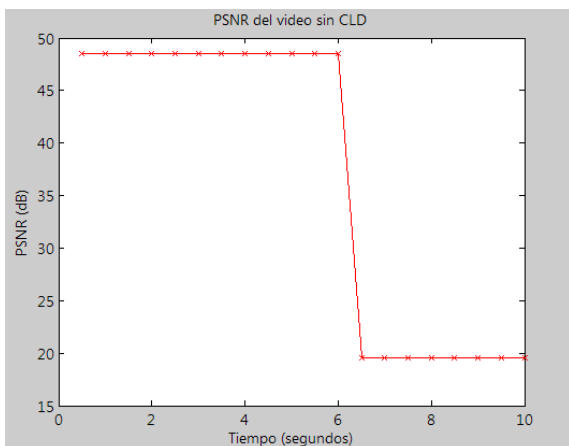


Figura 26. PSNR del video sin CLD en un canal inalámbrico con decaimiento lento.

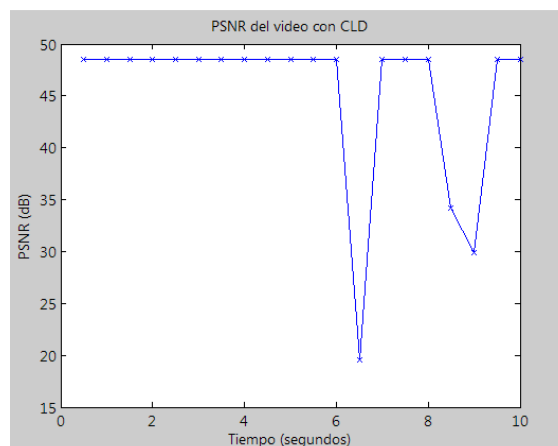


Figura 27. PSNR del video con CLD en un canal inalámbrico con decaimiento lento.

En el caso de un canal inalámbrico con un valor de SNR que desciende lentamente (figura 16), se observa cómo sin la implementación de la propuesta CLD (figura 26) la PSNR se mantiene constante hasta que hay cambios en el canal y desciende abruptamente a valores de los 20 dB sin recuperarse. En cambio, con la propuesta CLD (figura 27) se adapta para recuperar el nivel de PSNR que mantenía en un principio.

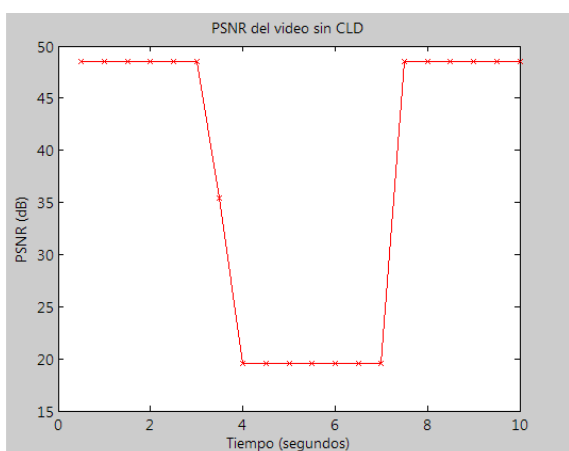


Figura 28. PSNR del video sin CLD en un canal inalámbrico con decaimiento y recuperación abruptos

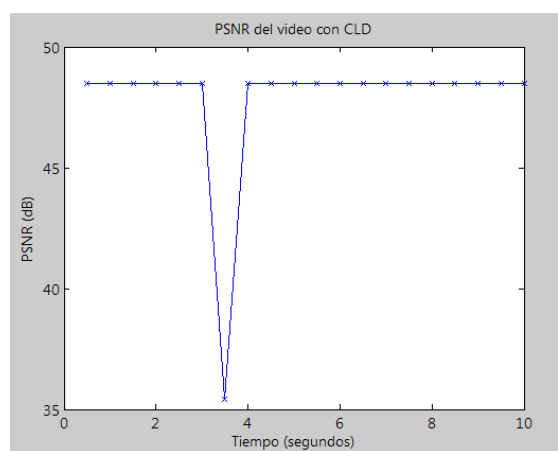


Figura 29. PSNR del video con CLD en un canal inalámbrico con decaimiento y recuperación abruptos

En el segundo caso, mostrado en el conjunto de figuras 21, la PSNR sin CLD sufre considerablemente cuando el canal se encuentra en un estado de SNR muy baja. La PSNR con CLD solamente le toma un momento adaptarse a esa cambio, sosteniendo un buen nivel de PSNR a lo largo de la transmisión.

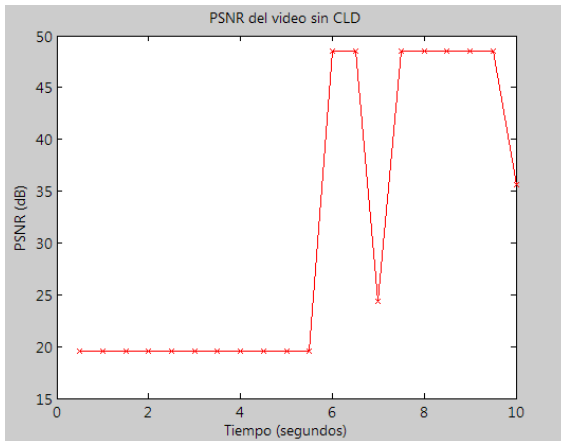


Figura 30. PSNR del video sin CLD en un canal inalámbrico con cambios lentos

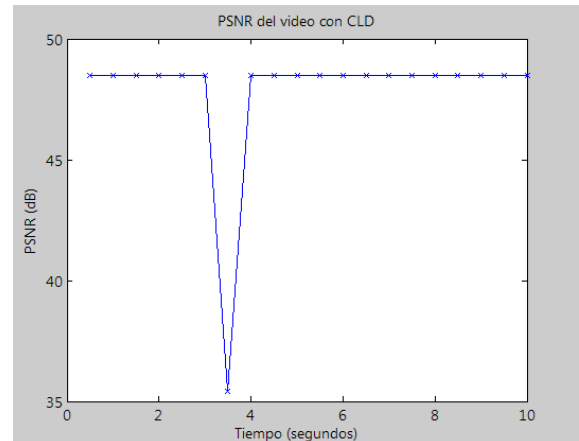


Figura 31. PSNR del video con CLD en un canal inalámbrico con cambios lentos

En el último caso, que se observa en las figuras 30 y 31, el nivel de PSNR se mantiene bajo porque el canal en un principio no satisface las condiciones de transmisión a la tasa de bit de la aplicación, por lo que la distorsión se presenta al principio. Por otro lado, gracias a la adaptación dinámica (figura 31), la PSNR logra mantener un buen nivel, por encima de los 45 dB.

El análisis de los resultados anteriores, permite modelar matemáticamente una función de distribución acumulada (CDF, por sus siglas en ingles). Gracias a una herramienta de Matlab llamada CFTool, se obtuvo la función que describe la CDF en función del nivel de distorsión con y sin CLD. La función que representa la CDF del sistema sin CLD es

$$f(x) = a_1 \sin(b_1 * x * c_1) + a_2 \sin(b_2 * x * c_2) + a_3 \sin(b_3 * x * c_3) + a_4 \sin(b_4 * x * c_4) \quad (33) \\ + a_5 \sin(b_5 * x * c_5) + a_6 \sin(b_6 * x * c_6) + a_7 \sin(b_7 * x * c_7)$$

Tabla VI. Coeficientes de la CDF correspondiente a la PSNR del sistema sin la implementación CLD.

Coeficiente	Valor	Coeficiente	Valor	Coeficiente	Valor
a ₁	1.05	b ₁	0.1169	c ₁	-2.736
a ₂	0.7568	b ₂	0.2122	c ₂	-2.851
a ₃	0.2727	b ₃	0.3829	c ₃	0.9733
a ₄	0.154	b ₄	0.6022	c ₄	-2.823
a ₅	0.09395	b ₅	0.7298	c ₅	2.55
a ₆	0.03503	b ₆	1.006	c ₆	3.309
a ₇	0.02438	b ₇	1.186	c ₇	0.7

y con la función que expresa la CDF con la implementación de CLD es

$$\begin{aligned}
 f(x) = & a_0 + a_1 \cos(x * w) + b_1 \sin(x * w) + a_2 \cos(2x * w) + b_2 \sin(2x * w) \\
 & + a_3 \cos(3x * w) + b_3 \sin(3x * w) + a_4 \cos(4x * w) + b_4 \sin(4x * w) \\
 & + a_5 \cos(5x * w) + b_5 \sin(5x * w) + a_6 \cos(6x * w) + b_6 \sin(6x * w) \\
 & + a_7 \cos(7x * w) + b_7 \sin(7x * w)
 \end{aligned} \tag{34}$$

Tabla VII. Coeficientes de la CDF correspondiente a la PSNR del sistema con la implementación CLD.

Coeficiente	Valor	Coeficiente	Valor
a ₀	2.433	w	0.1317
a ₁	2.88	b ₁	3.233
a ₂	-0.5006	b ₂	3.441
a ₃	-2.054	b ₃	1.225
a ₄	-1.285	b ₄	-0.5295
a ₅	-0.1448	b ₅	-0.6563
a ₆	0.1784	b ₆	-0.1772
a ₇	0.05976	b ₇	0.01598

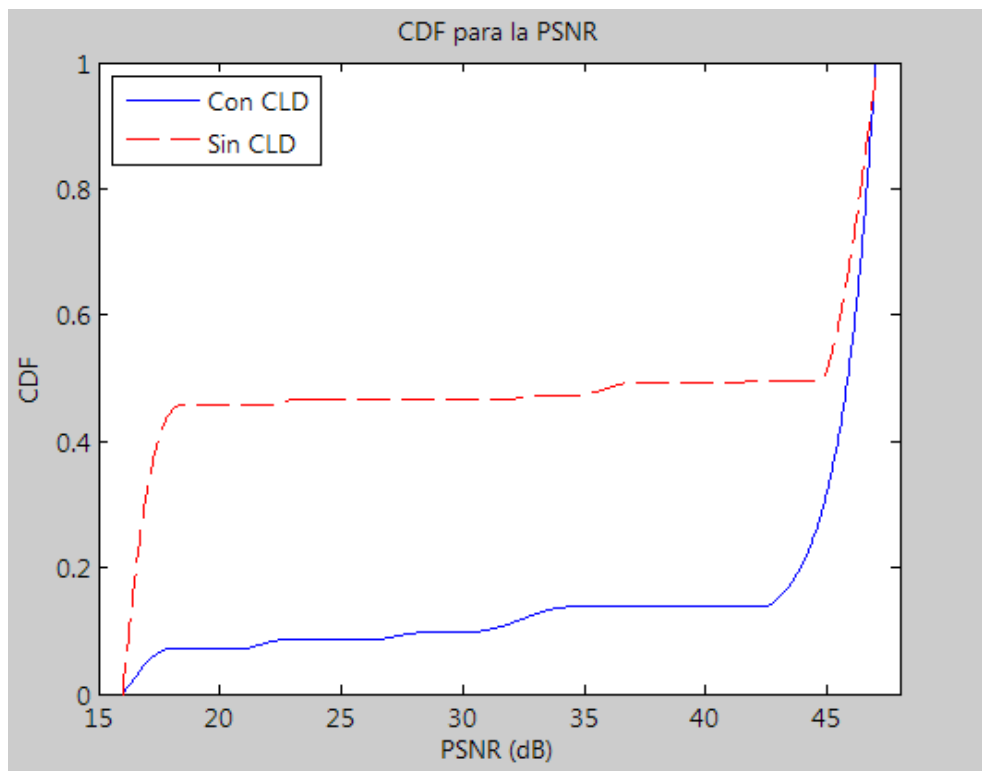


Figura 32. CDF para la PSNR utilizando y sin utilizar CLD.

En las gráficas 23, se puede apreciar como existe una alta probabilidad de tener valores inferiores a los 44 dB de PSNR sin el uso de CLD (aproximadamente el 42%). En cambio, con el uso de CLD se garantiza que existe más del 80% de probabilidad de tener una imagen con más de 44 dB de PSNR.

IV.3 Conclusiones del Capítulo IV.

En este capítulo se analizaron los resultados obtenidos de las simulaciones. Para el análisis de resultados, se realizaron simulaciones desde dos perspectivas: pérdidas de datos y distorsión en la imagen. La pérdida de datos proporciona información de la cantidad de bits que se pierden debido al que no se pueden satisfacer las demandas en cuanto a tasa de bit requerida por la aplicación, pero no proporciona información sobre la degradación que sufre el video. Por otro lado, el análisis de distorsión permite conocer que tanto se degrada la imagen recibida respecto a la original debido a las pérdidas, sin importar la cantidad de pérdidas, si no que tanto impactan en el video.

Capítulo V

Análisis de resultados y conclusiones

En este capítulo se analizarán los resultados obtenidos en las simulaciones. Este análisis permitirá concluir la efectividad del trabajo realizado, y permitirá conocer los elementos que se pueden implementar en un trabajo futuro.

V.1 Análisis de los resultados.

Al interpretar los resultados obtenidos en las simulaciones, se pueden ver mejoras en la aplicación. Por un lado, tener una menor cantidad de pérdidas de datos siempre es positivo, ya que eso indica que se tienen menos pérdidas en los cuadros del video. Por otro lado, también los números y gráficas indican como la distorsión de la imagen disminuye, debido a una menor cantidad de pérdidas, y en caso de tenerlas, que no coincidan en cuadros clave del grupo de imágenes.

El canal cambiante y la velocidad del móvil afectan al diseño propuesto, ya que la variación en la que cambia la cantidad de SNR medida es mayor que la velocidad de respuesta del sistema propuesto. Esto se puede ver en el primer caso propuesto, en donde se estima la optimización con un canal real simulado, con la suma de condiciones que conlleva (desplazamiento doppler, multitrayectorias y ruido blanco gaussiano). Aún así, se obtienen resultados favorables, donde se disminuyen las pérdidas a pesar del comportamiento del canal, aunque no sea en gran medida.

Los tres casos propuestos de un comportamiento de canal en cuanto a la SNR percibida, pretenden mostrar casos representativos de lo que sucede normalmente en el canal radio, y permite distinguir en qué casos resulta más eficiente el diseño propuesto en este trabajo.

V.2 Conclusiones.

La implementación de un sistema basado en Cross-Layer Design propuesto en este trabajo de tesis mejora la calidad de servicio percibida por el usuario en una sesión de videoconferencia utilizando una red WiMAX, ya que los resultados demostraron numéricamente que se reducen las pérdidas de datos en un promedio del 10%, y se disminuye la distorsión percibida en la imagen, garantizando que en un poco más del 80% de las veces se tendrá una mejor imagen con la propuesta de este trabajo de tesis, en comparación con el 40%, sin una adaptación.

Sin embargo, realizar una adaptación en los parámetros de video no solo conlleva en mejorar la calidad del video, si no que genera retrasos de procesamiento. Es importante que el diseño propuesto lo más reducido posible en la cantidad de parámetros abstraídos, ya que como se discutió en el capítulo II, afecta directamente en el desempeño del dispositivo móvil, o en el peor de los casos, el desempeño de la red.

La caracterización de las fuentes de tráfico permitió conocer la cantidad de tráfico generado y ver la eficiencia del codificador H.264, ya que los distintos tipos de escena impactan en la cantidad de tráfico generado. En este trabajo se busca que la aplicación se desenvuelva en entornos móviles, por lo que considerar algún tipo de escena indiscriminadamente no sería apropiado. Si el trabajo se basara en otro tipo de escena, i.e. un noticiero, el tipo de escena es distinto al elegido para este trabajo, donde resulto que el tipo de escena considerado es el que más tráfico genera.

En base a los resultados obtenidos, se pueden determinar cuáles son los entornos ideales y más complicados para la propuesta realizada. Un canal en donde la SNR varíe de manera brusca y constante es muy poco favorable para el sistema, ya que en el tiempo del GOP suele ser mucho mayor que el tiempo en el que se origina un cambio en el canal. Se sabe que no se puede controlar la SNR medida en el canal, porque no se tiene control sobre el entorno inalámbrico. Es por eso que las condiciones propuestas en este trabajo, nos permiten saber en qué situaciones resulta más eficiente la implementación de un sistema con una optimización Cross-Layer como la propuesta, por lo que con un modelado adecuado del canal, se puede saber que tal funcionará dicha implementación. La aplicación puede percibir que ocurrió un cambio al momento en el que inicia un GOP, sin embargo, al siguiente instante la SNR del canal puede aumentar o decrecer, por lo que en el caso de aumentar esta SNR se desperdicia el caudal eficaz ofrecido, dado que se estaría transmitiendo a una velocidad más baja de lo que se que sería posible en ese instante; si la cantidad percibida de SNR disminuye al momento de hacer una adaptación, es posible que ocurran pérdidas, ya que se puede considerar como obsoleto el ajuste realizado, sin embargo, existe un tiempo máximo de tolerancia al retardo, en el que se considera que la transmisión es en tiempo real, y un búfer almacena la información que no se puede enviar en ese momento. En un caso opuesto, donde la SNR del canal varía pocas veces, sin importar lo abrupto del cambio, resulta ser lo más favorecedor para el sistema propuesto, como se puede apreciar en las simulaciones realizadas.

En el sentido de distorsión de imagen, los parámetros que permiten conocer la efectividad de la propuesta de este trabajo están relacionados con el cuadro dentro de un GOP que se pierde. Los resultados arrojados indican que existe una menor probabilidad de perder cuadros importantes dentro del GOP con la optimización que sin ella.

La adaptación fue importante porque hay que recordar que este trabajo se centra en el estudio del enlace ascendente, donde la cantidad de recursos (tasa de bit disponible) es menor, esto aunado a que solo se usa una parte para la aplicación de videoconferencia.

Es importante hacer notar, que el diseño propuesto fue pensado con dos aspectos fundamentales: ser reducido y orientado sólo al dispositivo móvil. El hecho de que el diseño fuera reducido permite que los tiempos de procesamiento sean menores, lo cual es fundamental en una aplicación donde se es sensible al retardo; por otro lado, al ser orientado sólo al dispositivo móvil, permite que la implementación (así como lo fue la simulación) involucre solo modificaciones locales, lo cual le permite una interoperabilidad transparente con otros dispositivos que utilicen el mismo estándar de comunicaciones (WiMAX).

De tal forma, que se puede concluir que se cumplieron los objetivos tanto particulares como generales. Los resultados demuestran que se disminuye la pérdida de datos en un 10% y se mantienen niveles adecuados en la calidad de la imagen en más del 80% del tiempo. No obstante, aún pueden implementarse mejoras para un trabajo futuro.

V.3 Trabajo futuro.

Las condiciones que se establecieron en este trabajo son muy específicas, lo cual permite desarrollar trabajo futuro.

Es recomendable considerar que no solo es un dispositivo el que está realizando la videoconferencia. Incluir mas dispositivos permite crear un entorno más real, y permitiría experimentar con las posibilidades que brinda el sistema de colas usado en WiMAX.

Es posible que se presenten mejoras en el desempeño del sistema propuesto si se consideran ajustes programados. Esto es posible analizando el comportamiento del canal y poder hacer predicciones para realizar adaptaciones de manera más eficaz. Para esto sería necesario abstraer mas parámetros en la capa aplicación, aunque bien, también podría ser un módulo aparte al propuesto en este trabajo.

Otra adición interesante puede ser implementar el sistema propuesto con otro codificador, que permita realizar optimizaciones que no dependan del tiempo de procesamiento del grupo de imágenes, y evaluar si la idea propuesta en este trabajo funciona mejor con otros codificadores, aunque sean menos robustos.

Bibliografía

- Alim, O., Abdallah, H., Elaskary, A. 2008. Simulation of WiMAX Systems. IEEE. 11-16 p.
- Andrews, J., Ghosh, A., Muhamed, R. 2007. Fundamentals of WiMAX: Understanding Broadband Wireless Technology. Prentice Hall. Primera edición. Westford. 449 pp.
- Aune, F. 2004. Cross-Layer Design Tutorial. Creative Commons License. 35 pp.
- Carlisle, J. 2007. Tavarua: A Mobile Telemedicine System Using WWAN Striping. Trabajo de Tesis de Maestria. Massachusetts Institute of Technology. 78 pp.
- Choi, L., Kellerer, W. y Steinbach, E. 2006. On Cross-Layer Design for Streaming Video Delivery in MultiuserWireless Environments. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. 2006. 1-10 p
- Garza-Cantú, M. 2009. Política Digital. Nexos. 8(49). 14-20 p.
- IEEE. 2004. 802.16 IEEE Standard for Local and metropolitan area networks, Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile. 857 p.
- IEEE. 2005. 802.16e IEEE Standard for Local and metropolitan area networks, Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile, Amendment 2: Physical and Medium Access Control Layers for Combined Fixed and Mobile Operation. 857 p.
- Kwon, D., Shen, M. y Kuo, C. 2007. Rate Control for H.264 Video with Enhanced Rate and Distortion Models. IEEE Transactions on circuits and systems for video technology. 17(5). 517-529 p.
- Makarevitch, B. 2007. Adaptive resource allocation for WiMAX. The 18th Annual IEEE International Symposium on Personal. 6 pp.
- Olivares Domínguez, O. 2008. Ajuste automático de parámetros de QoS en videoconferencia móvil utilizando Cross Layer Design para redes inalámbricas 3G. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. 121 pp.
- Richardson, I. 2003. H.264 and MPEG-4 Video Compression. John Wiley & Sons. Primera edición. Chichester. 281 pp.

- Srivastava, V., Motani, M. 2005. Cross-Layer Design: A Survey and the Road Ahead. IEEE Communications Magazine. 12:112-119 p
- Sustainability of Digital Formats Planning for Library of Congress Collections. AMR, Adaptive Multi-Rate Speech Codec.
<http://www.digitalpreservation.gov/formats/index.shtml>. Visitado el 31 de agosto de 2009.
- Triantafyllopoulou, D., Passas, N., Salkintzis, A., y Kaloxylou, A. 2007. A heuristic cross-layer mechanism for real-time traffic over IEEE 802.16 networks. International Journal of Network management. 17: 347-361 p.

Anexo A. Caracterización de las fuentes de tráfico.

Con el fin de lograr la abstracción de parámetros a nivel de la capa de aplicación, fue necesario caracterizar las fuentes de tráfico.

Este proceso de caracterización consistió en llegar de manera experimental a una tasa de bit producido por cada una de las configuraciones de video. Para empezar con este proceso, fue necesario definir las configuraciones a considerar en el experimento, según las opciones de configuración proporcionadas por el programa utilizado.

En este caso, se cuenta con la posibilidad de elegir la configuración para:

- Cantidad de cuadros por segundo.
- Resolución de la imagen.
- Tipo de escena.

Este último parámetro no está dentro de las posibilidades dadas por el codificador, si no que es posible manipularla por el usuario.

La cantidad de cuadros por segundo, como su nombre lo indica, indica cuantos cuadros o imágenes están dentro de un segundo de video. A mayor cantidad de cuadros, mayor es la sensación de movimiento que se percibe. La resolución de la imagen no indica cuantos

pixeles componen la imagen: a mayor cantidad de resolución, mejor nitidez en la imagen. El tipo de escena describe que es lo que está sucediendo en la escena.

Del trabajo de [Olivares Domínguez, 2008], se sabe que el tipo de escena afecta a las características de codificación según el movimiento en un plano frontal y un plano de fondo. El video no es más que una sucesión de imágenes fijas, reproducidas de tal forma que dan la sensación de movimiento. El codificador de video divide las imágenes en un conjunto de bloques denominado macro bloque.

La efectividad de un codificador de video radica en la capacidad de poder identificar información redundante en el tiempo y en el espacio, para así poder enviar menos información y de tal forma, reducir la tasa de bit generada. Para esto, el codificador identifica de entre varios tipos de cuadros a la hora de hacer la codificación. En el perfil básico, que es el que se utiliza en servicios de videoconferencia, se distinguen 2 tipos de cuadros: I y P. El cuadro I es el que contiene la mayor parte de la información en una secuencia de cuadros. El cuadro P es un cuadro que contiene información de solamente como varia un cuadro con respecto al cuadro actual. Al ser el cuadro I el principal, la pérdida de este significa que ningún cuadro subsecuente se pueda decodificar.

El programa utilizado para el envío de video codificado en H.264 fue JMStudio. Este programa permite resoluciones de video desde 160 x 120 hasta 640 x 480¹⁰, y cantidades de cuadros por segundo que van desde 1 cuadro por segundo hasta 30 cuadros por segundo. Dadas las limitaciones de en el equipo de computo, así como la necesidad de evitar una gran cantidad de parámetros abstraídos, se eliminaron algunas de las configuraciones disponibles. Las configuraciones consideradas en el experimento se pueden apreciar en la tabla IX.

¹⁰ En resolución de video, las cantidades indican el numero de líneas de ancho de video por la cantidad de líneas de alto del video.

Tabla VIII. Configuraciones de video utilizadas en el programa JMStudio para la caracterización de fuentes de tráfico

Res\FPS	1	2	5	7.5	10	12.5	15	20	24	25	30
160x120	Si	Si	No	Si	Si	Si	Si	Si	No	Si	Si
176x144	Si	Si	No	Si	Si	Si	Si	Si	No	Si	Si
320x240	Si	Si	No	Si	Si	Si	Si	Si	No	Si	Si
352x288	Si	Si	No	Si	Si	Si	Si	Si	No	Si	Si
640x480	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No

Se consideraron 3 tipos de escenas: Mother and Daughter, Carphone y Foreman, las cuales se detallaron en el Capítulo II. Cada tipo de escena generaba una cantidad distinta de tráfico. Para evitar un funcionamiento incorrecto de la optimización implementada en este trabajo de tesis, se optó por considerar el tipo de escena que demandara mayor tasa de bit para su envío, la cual es el tipo de escena Foreman.

Las secuencias de video tuvieron una duración de 30 segundos, durante los cuales se simuló cada tipo de escena en 3 ocasiones, para tener una mayor cantidad de muestras y validar el modelado de las fuentes de tráfico.

Para poder conocer el tráfico que genera el video generado, se utilizó un programa de captura de paquetes llamado Wireshark, el cual permite capturar los datos a nivel de capa de red.

La figura 9 muestra un ejemplo del comportamiento del codificador. Se puede deducir en base a la gráfica y a los datos analizados en Wireshark, que los picos que se generan en la transmisión de video corresponden a la generación de cuadros I. Al ser este tipo de cuadro el más importante dentro de la secuencia de video, es imposible considerar una tasa de

bit más baja para la transmisión de video, por lo que este valor corresponderá entonces al utilizado en la caracterización.

La figura 10 muestra el resultado de obtener las tasas de bit pico generadas por cada una de las configuraciones de video definidas en la tabla IX. Cabe señalar que con el fin de optimizar aun más el diseño Cross-Layer, se eliminaron las configuraciones que generen una tasa de bit similar a otra configuración con mejor definición de imagen.

Gracias a la ayuda de los datos obtenidos y una aplicación de Matlab llamada CFTool, fue posible obtener las curvas y las funciones que definen a cada una de las configuraciones utilizadas (figura 11).

Anexo B. Modelo de WiMAX en Simulink.

Para cumplir el objetivo particular de obtener las curvas de SNR vs. BER en WiMAX para determinar los cambios en la tasa de codificación y esquema de modulación, fue necesario construir un modelo basado en el estándar 802.11e.

Para construir este modelo fue necesario implementar la capa física y la capa de enlace de datos, las cuales están especificadas dentro del estándar.

En la figura X se observa el modelo de bloques, que cubre las capas antes mencionadas. Estos módulos, son:

- MAC PDU.
- Aleatorizador.
- Codificador convolucional.
- Entrelazado.
- Modulador.
- OFDM.
- Canal con AWGN.

Los módulos mencionados anteriormente, a excepción del canal con AWGN, tienen su contraparte en el receptor, donde se hace una operación inversa para cada bloque usado en el transmisor.

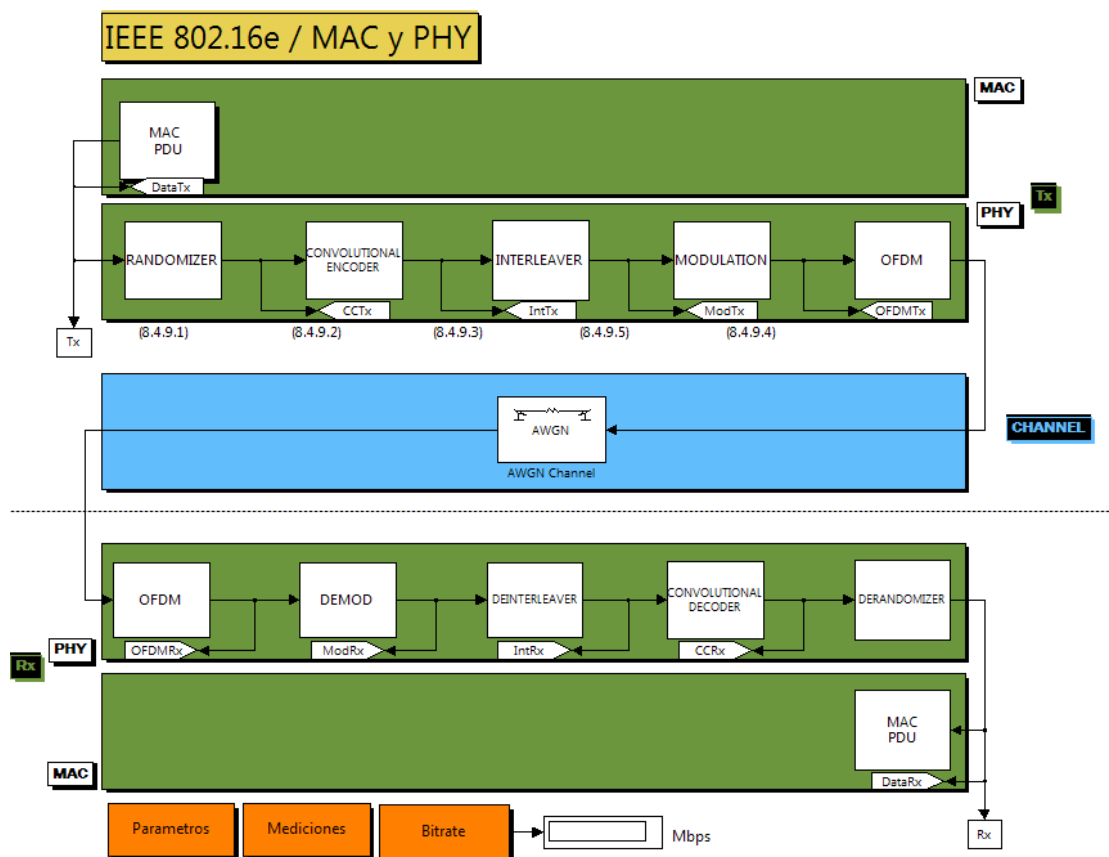


Figura 33. Modelo de las capa física y capa de enlace de datos de WiMAX realizado en Simulink.

La función del bloque de la capa de enlace de datos, es formar los bits de información proveniente de capas superiores y el encabezado perteneciente a la capa de enlace de datos. No tiene relevancia alguna los bits que se salgan de esta sección, ya que no se simula ningún tipo de flujo en específico. La finalidad es simplemente mandar una serie de bits y comprobar en el receptor que llegaron todos sin error alguno, cuando sea el caso.

En la capa física se encuentran la mayoría de bloques empleados en esta simulación. La razón de esto se debe a que el objetivo principal de este modelo es obtener unas curvas que nos demuestren la relación que existe entre la SNR y el BER, y dentro de la capa de aplicación se encuentran la mayoría de los mecanismos que permiten proteger y corregir los datos de posibles errores.

El aleatorizador permite distribuir los datos de manera no secuencial en la ristra de bits que se van a enviar, con el fin de evitar errores contiguos. Para esto, se emplea un generador de bits pseudo aleatorio, el cual genera bits con el polinomio generador

$$1 + x^{14} + x^{15} \quad (34)$$

que mezcla los bits a enviar por medio de la operación XOR. Además, se realiza un relleno de ceros para enviar la cantidad exacta de bits que necesita el siguiente módulo.

En el enlace ascendente o forward link, solo es obligatorio utilizar un codificador convolucional [IEEE, 2005], y de manera opcional el uso de turbo códigos. Los polinomios generadores para el codificador convolucional son

$$G_1 = 171_{\text{oct}} \quad (35)$$

$$G_2 = 133_{\text{oct}} \quad (36)$$

Después de la codificación convolucional, es necesario realizar un recortado para lograr las diferentes tasas de bits que ofrece WiMAX. Para la tasa de $\frac{1}{2}$ no es necesario realizar ningún recortado, ya que el codificador convolucional arroja 2 bits por cada bit que entra en el codificador. En el caso de una tasa de $\frac{3}{4}$ se utiliza la configuración

$$X = 101 \quad (35)$$

$$Y = 110 \quad (36)$$

con lo que se obtiene la tasa deseada.

La función del entrelazado es proteger los bits de errores contiguos. Para esto, se disponen los bits que se van a enviar en una matriz, donde el orden original va de fila en

fila, y para entrelazarlos, se envía columna por columna. El proceso de formar la matriz debe ser calcula de tal manera de balancear la cantidad de filas y columnas existentes en la matriz, y siempre dependerá de factores como cantidad de bits a enviar y la tasa de codificación.

En el proceso de modulación se representan los bits en forma de un seno y un coseno, y variando la magnitud de estos según el esquema de modulación. Es necesario que antes de enviar los bits al modulador, estos se agrupan en la cantidad de bits que necesita el modulador (2 bits para 4-QAM, 4 bits para 16-QAM y 6 bits para 64-QAM).

El módulo de OFDM se encarga de realizar la transformada inversa discreta de Fourier a los datos modulados, junto con las señales pilotos y portadoras nulas especificadas en el estándar de 802.16e. Este proceso va acompañado de agregar el prefijo cíclico que va a permitir a la señal enviada corregir errores por multitrayectorias.

El canal por el cual se simula el envío de datos es un canal que solo tiene ruido blanco aditivo gaussiano, lo cual se especifica en el estándar.

Todo este proceso conlleva un proceso inverso, con el fin de recuperar los datos enviados. Después de este proceso, es posible medir el BER comparando los bits enviados con los bits recibidos. Así, al realizar esta prueba en repetidas ocasiones para diferentes niveles de SNR, es posible obtener las curvas mostradas en la figura 12.

La tabla X muestra como los resultados obtenidos de la simulación son similares a los definidos en el estándar de WiMAX. Si bien, los resultados de la simulación son más altos que los definidos en el estándar, hay que considerar que solo se consideraron los requerimientos obligatorios de corrección de errores, por lo que es posible asemejar mas los resultados implementando mas medidas de seguridad.

Tabla IX. Comparación entre la cantidad de SNR estipulada en el estándar y la simulación para los diferentes esquemas de modulación y tasas de codificación

Modulación	Tasa de codificación	SNR (estándar)	SNR (simulación)
QPSK	$\frac{1}{2}$	5	6
	$\frac{3}{4}$	8	12
16-QAM	$\frac{1}{2}$	10.5	14
	$\frac{3}{4}$	14	18
64-QAM	$\frac{1}{2}$	16	20
	$\frac{3}{4}$	20	24