

Tesis defendida por

Carlos Arturo Martínez Ruvalcaba

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Roberto Conte Galván

Director de la tesis

Dr. Julio César Rolón Garrido

Co-director de la tesis

Dr. Miguel Ángel Alonso Arévalo

Miembro del Comité

Dr. Arturo Arvizu Mondragón

Miembro del Comité

M.C. Evelio Martínez Martínez

Miembro del Comité

Dr. César Cruz Hernández

Coordinador del
Programa de Posgrado en Electrónica y
Telecomunicaciones

Dr. Jesús Favela Vara

Director de la Dirección de Estudios de
Posgrado

Febrero de 2014

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



Programa de Posgrado en Ciencias
en Electrónica y Telecomunicaciones

Análisis de parámetros de calidad de servicio (QoS) en la transmisión de video digital vía
satélite para servicios de salud a distancia.

Tesis
que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestro en Ciencias

Presenta:
Carlos Arturo Martínez Ruvalcaba

Ensenada, Baja California, México
2014

Resumen de la tesis de Carlos Arturo Martínez Ruvalcaba, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Electrónica y Telecomunicaciones.

Análisis de parámetros de calidad de servicio (QoS) en la transmisión de video digital vía satélite para servicios de salud a distancia.

Resumen aprobado por:

Dr. Roberto Conte Galván

Hoy en día, los sistemas de telemedicina emplean distintos medios electrónicos a través de los cuales ofrecen servicios de salud que permiten que cada vez más personas tengan acceso a la salud pública. La infraestructura necesaria para brindar dichos servicios incorpora, entre otros, a los sistemas de Televisión Digital (DTV) que, además de establecer enlaces terrestres, utilizan también la comunicación satelital aprovechando una de sus mayores ventajas, el alcance en el área de cobertura. La transmisión de video digital a través de la radiodifusión televisiva es diferente para cada país que ya brinda este servicio, sin embargo, la tecnología de compresión en cada uno de estos sistemas está normalizada por un estándar en común, lo que permite la interoperabilidad y la versatilidad de los equipos.

Al aplicar las tecnologías de la información y las comunicaciones (TICs) además de los sistemas de DTV al ámbito de la salud pública, es necesario conocer, de una manera objetiva, la Calidad de Servicio (QoS) que éstas ofrecen y para tal propósito, existen parámetros que la definen puntualmente.

En el presente trabajo de investigación, se analiza el comportamiento de los parámetros de QoS en la transmisión de video digital utilizando el estándar de compresión H.264/MPEG-4, sobre un enlace satelital en el cual se hacen variar los valores de algunos de los elementos que lo conforman en un entorno simulado utilizando la herramienta de software matemático Matlab/Simulink.

Durante la etapa de pruebas, se obtuvieron gráficas que describen el desempeño de un enlace de comunicación satelital utilizando diferentes esquemas de modulación, así como distintas tasas de corrección de errores. A partir de dichas gráficas se determinó el porcentaje de la pérdida de información así como los datos que se reciben exitosamente además de la latencia total del sistema.

Palabras clave: Calidad de Servicio, Parámetros de QoS, H.264/MPEG-4 AVC, Enlace Satelital, Telemedicina, Video Digital.

Abstract of the thesis presented by Carlos Arturo Martínez Ruvalcaba submitted as a partial requirement to obtain the Master in Science degree in Electronics and Telecommunications.

Analysis of quality of service (QoS) parameters in digital video transmission via satellite for remote health services.

Abstract approved by:

Dr. Roberto Conte Galván

Nowadays, telemedicine systems use different electronic media through which they offer health services that allow more people to have access to public health. The infrastructure necessary to provide such services includes, among others, the systems of Digital Television (DTV) that, in addition to terrestrial, the satellite communication also used due to the advantage of one of its greatest virtues, the coverage area. The transmission of digital video over television broadcasting is made according to different standards adopted by each country already provides this service, however, the compression technology in each of these systems is normalized by a standard in common, enabling interoperability and versatility of the equipment.

When applying information technology and communications (ICT) as well as DTV systems to the field of public health, it is necessary to know, in an objective manner, the quality of service they offer and for such purpose, there are parameters that define it properly.

In the present research work, we analyze the behavior of the QoS parameters in digital video transmission over a satellite link using the H.264/MPEG-4 compression standard, on which values are varied for each of the elements that comprise it in a simulated environment using the mathematical software, Matlab / Simulink.

During the testing phase, graphs depicting the performance of a satellite communication link using different modulation schemes and different error correction rates were obtained. From these graphs it was determined the percentage of the information loss and data that are received successfully besides the total system latency.

Keywords: Quality of Service, QoS Parameters, H.264/MPEG-4 AVC, Satellite Link, Telemedicine, Digital Video.

Dedicatoria

A mis padres,

Bertha Ruvalcaba García y Arturo Martínez Navarrete,

A mis hermanos,

Arely y Oliver Eduardo

A mi abuela,

†Ma. del Refugio Navarrete Reza.

Agradecimientos

A Dios, por darme salud, fortaleza y voluntad para levantarme cada día y seguir adelante en este, el sendero de la vida.

A mi padre, Arturo, por enseñarme a perseguir y alcanzar mis más grandes anhelos con esfuerzo, dedicación, pasión y disciplina, adoptando siempre una buena actitud al ver el lado positivo de las cosas. Por su apoyo incondicional y por sus constantes palabras de aliento que me han ayudado siempre a sobrellevar y disfrutar cada momento de mis días lejos de casa.

A mi madre, Bertha, que me ha inculcado el valor de la unidad familiar del cual surgen los valores morales que hoy me definen como persona y que procuro practicar todos los días. Gracias mamá y papá por su amor incondicional.

A mis hermanos, Arely y Oliver, que les he aprendido el sentido de la perseverancia, por no dejarse vencer ante adversidades pasajeras. Sepan que sin ustedes, esto no tendría mérito.

A la familia Martínez Navarrete, que es mi segunda familia, a mis tías Yolo y Esthela, a mis tíos Nan, Luis, Jaime, Boni, Jorge, a mis primas Pau, Caro, Angélica, Jessica, Danielita, Liliana (por el estricto régimen al cual me mantuvo sometido) Lucía, Denisse, Julieta, Xóchitl, y a mis primos Gerardo, Jaziel, Danielito, Luis, Kevin, Iván, Vados, Didier, Daniel, Uriel, Edgar, Armando, Arat y Netza, por ser como hermanos para mí, por darme tantas alegrías y mantenerse juntos en los momentos más difíciles. Por hacer de este logro, un éxito para toda la familia. Por el cariño y la unidad que nos caracteriza.

A mi abuela Cuquita, por sus sabios consejos y divertidas anécdotas que me sirvieron de aire puro para el alma y que donde quiera que esté, sé que sigue pendiente tanto de mí como de todos sus retoños.

A Yasuko, por su interminable paciencia y comprensión, por los momentos buenos y los regulares que hemos vivido juntos de los que hemos conocido la madurez y la experiencia. Por ser mi mejor amiga, mi mayor inspiración y por ser parte importante en mi vida.

A mi mejor amigo, Cristóbal León, por no perder el contacto a pesar del tiempo y que por fortuitos vuelcos de la vida, siempre nos encontramos en los momentos adecuados con el gusto de saber que, citando a Voltaire, “toda la grandeza de este mundo no vale lo que un buen amigo”. Por ayudarme a salir de una extensa zona de confort y dar paso a más y mejores cosas.

Al mejor grupo de estudio al que he pertenecido, mis amigos y hermanos, Carlos Arellano, “Charmín” Hernández, Alex Carmona, Daniel Martínez, Pancho Domínguez, Belinda Galván, Oscar G. Butzman, Jorge Compeán, Manuel Moreno, Hilda Araujo, Mauricio Orta, y a Dulce Hernández que cumplió su palabra y vino a darse una vuelta. Por su amistad y su apoyo en este difícil, pero fructuoso viaje, gracias.

A mis ex compañeros y amigos, Rafa, Borrás, Mani, Martín, Genaro, Juan, Judith, Manuel, Laura, Sandra, Monse, Ilse, Pepe, Chuy, Donato, Roberto Silva, Selene, Martha, Ana Luz, Heber, Claudio, Roberto “El Puma”, Elvia, Guille, Cuquis, y al Lic. †Salvador Mendivil y Lic. Roberto Álvarez, por haberme dado la oportunidad de conocerlos e impulsarme a alcanzar mis objetivos siempre con la mejor de las disposiciones, sepan que por ustedes, ha sido el mejor trabajo que he tenido hasta ahora.

A los catedráticos del ITD, Francisco Godínez García, Rubén Guerrero Rivera, Eduardo Gamero Inda, Jesús Celis Porras, Manuel Sánchez Reyes, Melchor Díaz Arellano y Pedro Velázquez Ventura, por brindarme la ayuda y el impulso necesario para continuar con mis estudios en un posgrado.

A Verónica Rojas y Leonardo Yepes, por enseñarme a ver la vida con una incontrolable perspicacia además de picardía, a valorar lo que realmente debe ser valorado y desechar lo que no. Ambos son ejemplos de alegría y fortaleza. Por todos los momentos que compartimos llenos de risas, sueños, anhelos, secretos, lágrimas y carcajadas, y sobre todo amistad. Cada preciado segundo quedará atesorado en mi memoria y mi corazón.

A mis compañeros de laboratorio, Vero, Alex, Polo, Ramón y Leo que, a pesar de no pertenecer al selecto grupo de los doctorandos, me recibieron con los brazos abiertos en su círculo social así como en el laboratorio; los quiero muchachos, gracias por la oportunidad, espero no haberlos defraudado.

A mis compañeros de generación, “los de arriba” y a las vecinas por excelencia, Miriam, Anela, Karen, Gabriel, Carlos, Giovani, Enrique, Jonathan, Gonzalo, Shiro, “Mañe”, “Choche”, “Meño”, Fernando, Antonio, Yasmin, “Roco”, Ricardo, Raúl, mi paisana Lilia, “Susti”, Eva y Erika, por hacer de esta estancia más amena y por su apoyo en momentos especialmente críticos. Sepan que en mí tienen a un muy buen amigo, espero volver a verlos pronto en diferentes, sino, en mejores circunstancias, de preferencia lo segundo.

Al Dr. Roberto Conte Galván, por todo el apoyo que me brindó para realizar este trabajo de investigación, por sus acertados consejos tanto para la tesis como para la “vida real”, por darme la confianza necesaria para continuar hasta el final y creer siempre en mí.

Al Dr. David Covarrubias Rosales, por mantenerse al pendiente de todo, por la disposición y sencillez que lo caracterizan además de la constancia en su dinámica de trabajo, lo cual he aprendido. Porque a través de usted, aprendí que hay tiempo para todo, si a todo se le da su debido tiempo.

Al Dr. Julio Rolón Garrido, por sus importantes aportaciones a este trabajo de tesis y por su paciencia a la hora de definir el rumbo que éste tomaría. Por la disposición para hacer un buen trabajo.

Al Dr. Miguel Alonso Arévalo, por su constante ayuda para el desarrollo de esta tesis y por el buen ánimo con que mantuvo al laboratorio. Por enseñarnos a ser más estrictos con nosotros mismos, por lo menos, en el gusto al café.

Al Dr. Arturo Arvizu Mondragón y al M.C. Evelio Martínez, por sus comentarios, observaciones y aportaciones que me ayudaron a mejorar este trabajo de tesis.

A la Dra. Amanda Gómez González, por sus oportunos consejos y por ayudarme a descubrir que la ciencia debe ser para el beneficio de la humanidad, difundiendo y compartiendo los conocimientos que en ella reposan.

Al capital humano del CICESE, Erika, Aurora, Rosy, Ivonne, Norma, Citlali y Dolores por brindarme la ayuda necesaria para mi estancia académica durante este tiempo, además por su gran espíritu de servicio.

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, CICESE, por abrirme las puertas de su casa y darme la oportunidad de crecer personal y profesionalmente. Estoy profundamente agradecido.

Al CONACyT, por la beca otorgada durante mi estancia en esta institución.

Contenido

Resumen en español.....	ii
Resumen en inglés	iii
Dedicatoria	iv
Agradecimientos	v
Índice de figuras	xi
Índice de agradecimientos	xiii
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Marco de referencia	3
1.3. Objetivo de la tesis.....	4
1.3.1. Objetivo específico	4
1.4. Metodología de la investigación.....	5
1.5. Infraestructura utilizada	5
1.6. Organización de la tesis	6
Capítulo 2. Telesalud y telemedicina.....	7
2.1. Introducción.....	7
2.2. Niveles de atención médica.....	8
2.2.1. Primer nivel de atención	8
2.2.2. Segundo nivel de atención	9
2.2.3. Tercer nivel de atención	9
2.3. Telesalud	10
2.4. Telemedicina	11
2.4.1. Servicios de telemedicina.....	12
2.4.2. Rehabilitación física a distancia	13
2.5. El video como herramienta de diagnóstico	14
2.6. Estado actual de la telemedicina en México	15
Capítulo 3. Estándares para video y TV digital.....	18
3.1. Digital Video Broadcasting by Satellite (DVB-S).....	18
3.2. Digital Video Broadcasting by Satellite – Second Generation (DVB-S2)	19

3.3.	Digital Video Broadcasting – Return Channel Satellite (DVB-RCS)	21
3.4.	Advanced Television System Committee (ATSC).....	23
3.5.	Integrated Services Digital Broadcasting (ISDB)	24
3.6.	Compresión de video	26
3.7.	H.264/MPEG-4.....	27
3.7.1.	Objetivo del estándar	27
3.7.2.	Aplicaciones	28
3.7.3.	Principales características	28
3.7.3.1.	Capa de abstracción de red (NAL)	31
3.7.3.2.	Unidades NAL.....	32
3.7.3.3.	Unidades NAL en formato Byte-Stream.....	32
3.7.3.4.	Unidades NAL en formato de Sistema de Transporte de paquetes	32
3.7.3.5.	Unidades NAL VCL y no VCL.....	33
3.8.	Comparación de herramientas con H.262/MPEG-2	33
3.9.	Comunicación satelital y telemedicina	34
Capítulo 4. Implementación de modelos de simulación		36
4.1.	Modelo del enlace de comunicación.....	36
4.1.1.	Etapa de transmisión.....	37
4.1.1.1.	Señal fuente	37
4.1.1.2.	Codificación fuente.....	38
4.1.1.3.	Codificación de canal.....	39
4.1.1.4.	Modulación digital.....	40
4.1.1.5.	Filtro transmisor	42
4.1.2.	Etapa de recepción.....	42
4.2.	Parámetros de calidad de servicio (QoS).....	43
4.2.1.	Caudal eficaz	43
4.2.2.	Latencia	44
4.2.2.1.	Retardo por codificación/decodificación	45
4.2.2.2.	Retardo por transmisión/recepción	45
4.2.2.3.	Retardo por acceso al medio	45
4.2.2.4.	Retardo por propagación.....	46

4.2.3.	Variación del retardo	47
4.2.4.	Tasa de pérdida de paquetes.....	47
4.2.5.	Tasa de bit erróneo.....	48
Capítulo 5. Simulaciones y análisis de resultados		49
5.1.	Introducción.....	49
5.2.	Escenario de simulación.....	49
5.3.	Análisis de resultados	51
5.3.1.	Escenario A con modulación QPSK (FEC 1/2)	51
5.3.2.	Escenario B con modulación 8PSK (FEC 1/2)	52
5.3.3.	Escenario C con modulación 16QAM (FEC 1/2).....	53
5.3.4.	Comparación de los escenarios A, B y C (FEC 1/2)	54
5.3.5.	Escenario A con modulación QPSK (FEC 2/3)	56
5.3.6.	Escenario B con modulación 8PSK (FEC 2/3)	57
5.3.7.	Escenario C con modulación 16QAM (FEC 2/3).....	57
5.3.8.	Comparación de los escenarios A, B y C (FEC 2/3)	58
5.3.9.	Escenario A con modulación QPSK (FEC 3/4)	60
5.3.10.	Escenario B con modulación 8PSK (FEC 3/4)	61
5.3.11.	Escenario C con modulación 16QAM (FEC 3/4).....	61
5.3.12.	Comparación de los escenarios A, B y C (FEC 3/4)	62
5.3.13.	Latencia	64
Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones		65
6.1.	Conclusiones.....	65
6.2.	Aportaciones.....	70
6.3.	Recomendaciones	71
6.4.	Trabajo futuro	71
Referencias bibliográficas		73
Anexo A		78
Anexo B.....		79
Acrónimos		82

Índice de Figuras

Figura	Pág.
1. Disciplinas que incorpora la Telesalud.	10
2. Servicios de la Telemedicina en el entorno médico.	13
3. 18 Estados de la República que cuentan con Hospitales equipados con tecnología satelital.	16
4. 23 Estados de la República que brindan servicios de Tele-educación en Hospitales incorporados al Programa Nacional de Telemedicina.	16
5. Ejemplo de predicción intra-cuadro (Modo 0 o predicción vertical, donde las muestras que se encuentran encima de un bloque de 4x4 son copiadas en el siguiente bloque como indican las flechas).	30
6. Ejemplo de predicción inter-cuadro donde se toman las características de cuadros anteriores para la codificación del cuadro actual.	30
7. Diagrama a bloques del enlace de comunicación.	36
8. Paquete de MPEG Transport Stream.	38
9. Compresión basada en bloques de H.264/MPEG-4.	38
10. Esquema de la TCM.	39
11. Función de la TCM para una señal QPSK con una tasa de 2/3 y salida 8PSK.	40
12. Constelación de los esquemas de modulación (a) QPSK, (b) 8PSK y (c) 16QAM.	41
13. Forma del pulso del coseno alzado en el dominio de la frecuencia con $\beta = 0$, $\beta = 0.5$ y $\beta = 1$	42
14. Parámetros para el cálculo del retardo por propagación.	46
15. Porcentaje de paquetes perdidos y tasa de datos recibidos exitosamente en QPSK con una tasa de 1/2.	52
16. Porcentaje de paquetes perdidos y tasa de datos recibidos exitosamente en 8PSK con una tasa de 1/2.	53
17. Porcentaje de paquetes perdidos y tasa de datos recibidos exitosamente en 16QAM con una tasa de 1/2.	54
18. BER para una tasa de 1/2 en QPSK, 8PSK y 16QAM.	55

19.	Porcentaje de paquetes perdidos y tasa de datos recibidos exitosamente en QPSK con una tasa de $2/3$	56
20.	Porcentaje de paquetes perdidos y tasa de datos recibidos exitosamente en 8PSK con una tasa de $2/3$	57
21.	Porcentaje de paquetes perdidos y tasa de datos recibidos exitosamente en 16QAM con una tasa de $2/3$	58
22.	BER para una tasa de $2/3$ en QPSK, 8PSK y 16QAM.	59
23.	Porcentaje de paquetes perdidos y tasa de datos recibidos exitosamente en QPSK con una tasa de $3/4$	60
24.	Porcentaje de paquetes perdidos y tasa de datos recibidos exitosamente en 8PSK con una tasa de $2/3$	61
25.	Porcentaje de paquetes perdidos y tasa de datos recibidos exitosamente en 16QAM con una tasa de $3/4$	62
26.	BER para una tasa de $3/4$ en QPSK, 8PSK y 16QAM.	63
27.	Curvas del PSNR para una secuencia de video de 40 s en aplicaciones de streaming.	66
A.1.	Curva que denota la relación entre QoE y QoS.....	78

Índice de Tablas

Tabla	Pág.
1. Servicios de la Telemedicina.....	12
2. Comparación entre DVB-S y DVB-S2 para televisión digital.....	20
3. Comparación entre DVB-RCS y DVB-RCS2 para televisión digital	22
4. Características del estándar ISDB-S	25
5. Tabla comparativa de MPEG-2 Video (H.262) y MPEG-4 AVC (H.264).....	33
6. Características de la muestra de video	37
7. Ubicación de las estaciones terrenas.....	49
8. Especificaciones del satélite Satmex 6.....	50
9. Orientación de los enlaces de subida y de bajada entre Ensenada y la Cd. de México.....	50
10. Tasa de pérdida de paquetes, caudal eficaz y latencia para la modulación QPSK, 8PSK y 16QAM con una tasa FEC de 1/2.	55
11. Tasa de pérdida de paquetes, caudal eficaz para la modulación QPSK, 8PSK y 16QAM con una tasa FEC de 2/3.	59
12. Tasa de pérdida de paquetes, caudal eficaz y latencia para la modulación QPSK, 8PSK y 16QAM con una tasa FEC de 3/4.	63
13. Resultados de la Tasa de Paquetes Perdidos (TPP) y Caudal Eficaz (CE) para las modulaciones QPSK, 8PSK y 16QAM aplicadas al sistema.....	68

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes

Históricamente, la telemedicina comenzó desde el inicio de las comunicaciones eléctricas, ya que se tiene registro de que el contenido de la primer llamada telefónica puede considerarse como una aplicación de urgencia médica a distancia (Darkins & Cary, 2000). Posteriormente, el avance de la telemedicina se vio limitado por el uso de información analógica telefónica (voz) y de imágenes (grabaciones de video, fotografías de pacientes, de lesiones y placas de rayos X) entre médicos, utilizando tecnología telefónica fija (voz y módems) principalmente.

Estas aplicaciones se han visto expandidas y apoyadas recientemente por las Tecnologías de la Información y Comunicaciones (TICs), al usar equipo electrónico y de cómputo orientados a la atención médica de pacientes locales y remotos. Las redes de telemedicina son parte de la telesalud, y están contenidas dentro del nuevo concepto de salud y servicios médicos apoyados por las TICs, también conocido como e-salud. Actualmente existen redes de telemedicina basada en videoconferencia en varios países del mundo, aunque generalmente se limitan a servicios de atención privada al paciente (hospitales privados y compañías aseguradoras), y sólo en muy contados casos se atiende la salud y medicina social, por lo general en lugares apartados o en naciones poco desarrolladas. Aún en estos casos, el servicio de Telemedicina sólo cubre a una pequeña porción de la población, y es poco común el uso de equipo periférico digital de apoyo a médicos especialistas.

En el caso específico de México, la Telemedicina actual surgió dentro de programas piloto en varias instituciones de salud pública y privada, aunque siempre de corta duración y sin continuidad ni como parte de un programa permanente. El ISSSTE inició su Programa Nacional de Telemedicina en 1995, y más adelante de telesalud, logrando a la fecha tener comunicación por videoconferencia y de diagnóstico con cobertura nacional usando enlaces digitales terrestres y vía satélite (Hernández M. , 2009). Una manera de garantizar el nivel

de calidad necesario en el manejo de información médica sobre redes de comunicaciones es mediante la especificación de los parámetros de Calidad de Servicio o QoS (por sus siglas en inglés), y su comportamiento sobre las redes que los transportan.

Las redes de comunicaciones para información médica incluyen tecnología tal como Internet convencional e Internet2 así como enlaces de banda ancha celulares y satelitales, permitiendo la transmisión de información médica con suficiente QoS para proporcionar un diagnóstico médico a distancia de manera eficaz y eficiente. Estos parámetros son importantes dado que indican la calidad del enlace de datos sobre la red, cualquiera que sea ésta, y que están relacionados con el retardo (*jitter* y latencia) y la integridad de la información (BER y PLR), así como su caudal eficaz (*throughput*) en general. Además, los parámetros de QoS aceptables serán diferentes para distintas especialidades médicas, de acuerdo a las características de la información requerida en cada caso. La información requerida por un cardiólogo tiene características muy diferentes a la información requerida por un radiólogo, y ambas a su vez, de aquella requerida por dermatólogos o neurólogos, por sólo dar unos ejemplos. Las características de QoS para el envío de información médica y de señales biomédicas, tanto sobre enlaces y redes de comunicaciones como para distintas especialidades médicas, no han sido aún determinadas ni especificadas, por lo que éstos son los principales temas de investigación de este proyecto de tesis.

Sin embargo, la normatividad en esta área tiene un número de inconvenientes que necesitan ser atendidos antes de que la telemedicina pueda ser usada de la mejor manera posible, por lo que se pretende establecer una serie de parámetros de QoS que permitirán a las instituciones de salud disminuir los costos en la compra y operación del equipo médico digital y sus redes de transporte, buscando ofrecer una mejor atención en el cuidado de la salud de pacientes remotos a menor costo, con una mejor participación de los médicos involucrados y con menos molestias al paciente, además de apoyar la creación de estándares.

1.2. Marco de referencia

La comunicación vía satélite establece enlaces para la transmisión de datos, imágenes, audio y/o video con una excelente calidad, prueba de ello es la señal digital recibida en los televisores de nuestros hogares. Los sistemas televisivos de hoy en día son un ejemplo del uso de las comunicaciones satelitales, sin embargo, actualmente los servicios que se proporcionan por este medio se extienden más allá del ámbito del entretenimiento alcanzando así al sector salud. Los servicios sanitarios son una parte importante en el desarrollo de los países por lo que las nuevas tecnologías de información y comunicaciones brindan una herramienta fundamental para el diagnóstico y tratamiento de pacientes con impedimentos tales como el traslado de su lugar de origen a un centro médico especializado debido a posibles limitaciones físicas; esto se ve en poblados alejados de los hospitales con médicos especializados.

Diferentes estándares que normalizan a las telecomunicaciones inalámbricas definen los parámetros de compresión de las señales transmitidas en el espacio radioeléctrico. Uno de éstos es el estándar H.264/MPEG-4 AVC desarrollado conjuntamente entre el VCEG (*Video Coding Experts Group*) de la ITU-T (*Telecommunication Standardization Section of the International Telecommunication Union*) y el MPEG (*Moving Pictures Experts Group*) del ISO/IEC (*International Organization for Standardization*) el cual es uno de los que actualmente se emplean para aplicaciones multimedia interactivas como lo es la videoconferencia, la transmisión y el almacenamiento de video digital. H.264/MPEG-4 AVC presenta mejoras en la compresión de video con respecto a sus versiones antecesoras, al permitir que una menor cantidad de información sea enviada a través del canal de transmisión sin comprometer la calidad de imagen resultante.

La calidad de la señal de video en videoconferencia y en la transmisión de video es determinante en aspectos como los retrasos de la señal, la frecuencia con que se presentan estos retrasos, así como la pérdida de información. Entre las aplicaciones de la telemedicina se encuentran especialidades médicas orientadas al tratamiento de pacientes con enfermedades que debilitan o reducen la movilidad de distintas partes del cuerpo por lo que para valorar la efectividad de ejercicios y rutinas para el fortalecimiento muscular así como el progreso que tiene el paciente en su recuperación es necesario asegurar la continuidad del video y la integridad de la imagen que se capturan en cada sesión.

La Calidad de Servicio en la transmisión y recepción de video para este tipo de consultas médicas debe garantizarse durante el enlace satelital, principalmente tomando en cuenta tres factores: el retardo (en inglés conocido como *latency*), la variación del retardo (jitter) y la pérdida de paquetes de información (PLR por sus siglas en inglés). El estándar H.264/MPEG-4 AVC es una mejor opción para su uso en aplicaciones médicas y almacenamiento de video digital al brindar mayores beneficios de compresión para su transmisión vía satélite.

1.3. Objetivo de la tesis

El objetivo general de la tesis es analizar el comportamiento de los parámetros de calidad de servicio en un enlace de comunicación vía satélite para transmitir video digital con contenido médico y conocer la operación del estándar H.264/MPEG-4 AVC aplicado para tal fin.

1.3.1. Objetivo específico

El objetivo particular de este trabajo de investigación es desarrollar programas de simulación enfocados a la obtención de parámetros de calidad de servicio (pérdida de información y retardo) en la transmisión de video digital vía satélite en base al estándar de compresión H.264/MPEG-4 AVC para su uso en consultas médicas. Estableciendo escenarios de simulación con esquemas de modulación y tasas de corrección de errores diferentes se realizarán pruebas que permitan obtener los parámetros de calidad de servicio que presente el enlace.

1.4. Metodología de la investigación

A continuación se enlista la metodología para alcanzar las metas mencionadas:

- Búsqueda de información sobre sistemas de telemedicina que hacen uso de las redes satelitales y los servicios que ofrecen.
- Estudio de los estándares de televisión digital vía satélite utilizados a nivel internacional.
- Estudio del formato de las señales de video digitales utilizadas en telemedicina.
- Análisis del estándar H.264/MPEG-4 AVC en la compresión de señales de video.
- Definir los escenarios para las simulaciones tomando en cuenta el estándar H.264/MPEG-4 AVC y su aplicación en la transmisión de videos relacionados con el área de fisioterapia.
- Evaluación e integración de modelos de simulación con parámetros de QoS utilizando el estándar H.264/MPEG-4 AVC en enlaces satelitales.
- Realizar las simulaciones pertinentes y capturar los datos para su análisis.
- Elaboración de una comparación de modelos de simulación para transmisión de video vía satélite con los valores aceptables de QoS en telemedicina obtenidos a partir del uso del estándar H.264/MPEG-4 AVC.
- Obtención y comparación de resultados del proyecto.
- Discusión de resultados.
- Conclusiones generales del trabajo de investigación.

1.5. Infraestructura utilizada

Para la realización de este trabajo de investigación se hizo uso de:

- Equipo de super cómputo.
- Material de consulta disponible en Internet y la biblioteca del CICESE.
- Matlab y Simulink 2013.

1.6. Organización de la tesis

La estructura del presente trabajo de investigación se describe en los siguientes párrafos:

El Capítulo 1 brinda una introducción sobre la práctica de la telemedicina y los elementos que la conforman. Se enfoca en los objetivos del presente trabajo de investigación describiendo la metodología que se siguió para obtener los resultados descritos en los capítulos subsecuentes. Además, se mencionan la infraestructura utilizada y las fuentes de información que fueron útiles para las bases de la tesis.

El Capítulo 2 aborda el tema de la atención a la salud pública en términos del uso de las tecnologías de información y comunicaciones incluyendo el panorama actual en México definiendo así a la telemedicina y la telesalud.

En el Capítulo 3 se describen los diferentes estándares internacionales que rigen la transmisión de televisión digital, los cuales se mencionan a continuación: DVB- S, DVB-S2, DVB-RCS, ATSC e ISDB. También se explica con detalle el estándar H.264/MPEG-4 resaltando sus características principales y diferencias con respecto a su versión antecesora.

En el Capítulo 4 se definen las etapas que conforman el enlace satelital utilizado en las simulaciones correspondientes haciendo énfasis en los parámetros de calidad de servicio que se analizarán en las pruebas del siguiente capítulo.

El Capítulo 5 explica los distintos escenarios de simulación considerando la obtención de los parámetros de calidad de servicio bajo diferentes condiciones de operación y se presenta el análisis de los resultados conseguidos.

El Capítulo 6 contiene las conclusiones, aportaciones y recomendaciones de la tesis. Se propone un trabajo futuro que se puede realizar en dado caso de continuar la línea de investigación que sigue este trabajo.

Capítulo 2

Telesalud y telemedicina

2.1. Introducción

El uso conjunto de las tecnologías de telecomunicaciones, electrónica y computación, brinda una herramienta de apoyo para la práctica de la medicina a distancia entre el paciente y el médico tratante, con fines clínicos, conocida como “*Telemedicina*”. Esta consiste en la utilización de infraestructura de red de banda ancha para enviar la información biomédica, permitiendo su descentralización e interconectando el lugar donde se encuentre el paciente con médicos en salas de emergencia en clínicas y hospitales, y obtener una segunda opinión para dar un diagnóstico a distancia. La gente que vive en áreas rurales y remotas tiene problemas para acceder a servicios médicos debido a aspectos geográficos, inaccesibilidad por caminos inadecuados o inexistencia de transporte, donde intervienen aspectos económicos, laborales y culturales. Las instituciones encargadas de atender los servicios de salud en México poseen una distribución limitada de recursos de salud y carencia de personal, existiendo áreas rurales con grandes carencias.

Por otro lado, aunque la gran mayoría de la población de nuestro país cuenta con servicio y atención médica, frecuentemente viven en áreas rurales y remotas, con problemas para acceder a servicios médicos debido a las razones arriba descritas. Estos aspectos se agudizan en el caso de accidentes laborales, lo que redundaría en pérdida de tiempo para los trabajadores y una baja sensible de productividad en sus lugares de trabajo, además de encarecer los servicios de atención médica y posiblemente incapacitando temporal o permanentemente al trabajador accidentado.

Existen instituciones de atención a la salud que cuentan con la infraestructura adecuada para atender todo tipo de emergencias a sus derechohabientes, aunque generalmente se encuentran en grandes ciudades, lejos de áreas suburbanas, rurales y remotas, cuestión en la que la comunicación satelital encuentra una brecha que logra superar. Debido a esto se ha buscado que la tecnología actual brinde las herramientas necesarias para mejorar la comunicación entre los domicilios y lugares de trabajo, con las clínicas y hospitales del sector salud. Algunas instituciones buscan hacer un mejor uso de

los recursos tecnológicos existentes y disponibles en el país para brindar atención médica a distancia, buscando determinar cuáles redes de comunicaciones públicas pueden servir más eficientemente a la telemedicina de cualquier especialidad (Hernández M. , 2009). El uso de tecnología cableada e inalámbrica permite unir a los lugares de atención médica básica y de trabajo con instituciones médicas y de salud, ofreciendo un rápido servicio en situaciones de emergencia médica y así desarrollar nuevas tecnologías que permitan brindar un buen servicio de salud en México. Además, es importante determinar cuáles áreas de la medicina se adaptan mejor a las nuevas redes de comunicaciones públicas, permitiendo servir más eficientemente a médicos especialistas de cualquier especialidad con el apoyo de la telemedicina.

2.2. Niveles de atención médica

Con la intención de ubicar en un contexto más amplio a los servicios sanitarios en las instituciones de salud, se describen a continuación los tres niveles de atención médica con que se resuelven las necesidades de salubridad de acuerdo a la magnitud y severidad (Organización Panamericana de la Salud, Oficina Regional de la Organización Mundial de la Salud, 2007) Este apartado permitirá comprender de una manera más extensa el uso de los recursos tecnológicos en los servicios de salud pública.

2.2.1. Primer nivel de atención

Casi ocho de cada 10 (78.3%) unidades de atención a la salud en México ofrecen servicios catalogados dentro del primer nivel de atención médica, las cuales se reparten en las diferentes instituciones de salud pública (centros de salud, clínicas, unidades de medicina familiar, etc.) la mayoría pertenecientes al sector público (98.2%) (Secretaría de Salud, 2013). Se caracteriza por encargarse de los problemas de salud que presuponen un cuidado de baja complejidad, por lo que no se requieren estudios técnicos o de mayor especialización que la que puede brindar un médico general de cabecera. Dentro de sus principales funciones, además de diagnóstico y tratamiento médico, se encuentra la

promoción de actividades que prevengan algunas enfermedades comunes y de promover un estilo de vida saludable (Segen, 1992).

Algunas de las clínicas que ofrecen estos servicios, se encuentran en regiones poco urbanizadas o poblados rurales aledaños a grandes ciudades.

2.2.2. Segundo nivel de atención

El segundo nivel de atención médica se ofrece en hospitales regionales que cuentan con el equipo necesario para atender enfermedades, padecimientos o urgencias médicas que requieran de cuidados especiales y una observación continua. Las instalaciones de los hospitales que brindan este nivel de atención están equipadas con áreas de obstetricia y ginecología, laboratorios, unidades de cuidados intensivos, quirófano, etc. Cabe mencionar que este nivel de atención se enfoca más a la recuperación y tratamiento por lo que no brinda cuidados de forma ambulatoria (Segen, 1992).

2.2.3. Tercer nivel de atención

El tercer nivel de atención médica se ofrece en hospitales de especialidades que cuentan con la infraestructura adecuada para atender enfermedades o padecimientos cuyo origen es poco conocido, motivo por el cual, dichos hospitales tienen a la mano la tecnología y el personal especialista necesario para el desarrollo de investigación científica en materia de salud. Generalmente los pacientes que asisten a los centros médicos que brindan el tercer nivel de atención son enviados por médicos del segundo nivel (Segen, 1992).

En México existe el Centro Médico Nacional, el cual forma parte de una cadena de Hospitales de segundo y tercer nivel de atención que están orientados al tratamiento de pacientes con agentes patológicos poco comunes (Burr, Piñó, Quiroz, & Martín-Lunas, 2011).

2.3. Telesalud

La telesalud incorpora distintos tipos de sistemas de comunicación utilizados para la transmisión y recepción de información médica, el propósito es establecer una plataforma que integre las herramientas necesarias para que el sector gubernamental, responsable de la salud pública, realice un adecuado manejo de la infraestructura y recurso humano para el intercambio de información útil en el tratamiento de enfermedades.

A diferencia de la telemedicina, la telesalud no sólo se enfoca en la curación y tratamiento de enfermedades, sino que también integra la administración de personal clínico, programas de salud con fines informativos, tratamiento de pacientes y familiares, utilizando medios alámbricos o inalámbricos de telecomunicaciones, lo que repercute en un mayor alcance tecnológico.

Algunas funciones generales que se incorporan a este sistema se muestran en la Figura 1 (Centro Nacional de Excelencia Tecnológica en Salud, 2011).

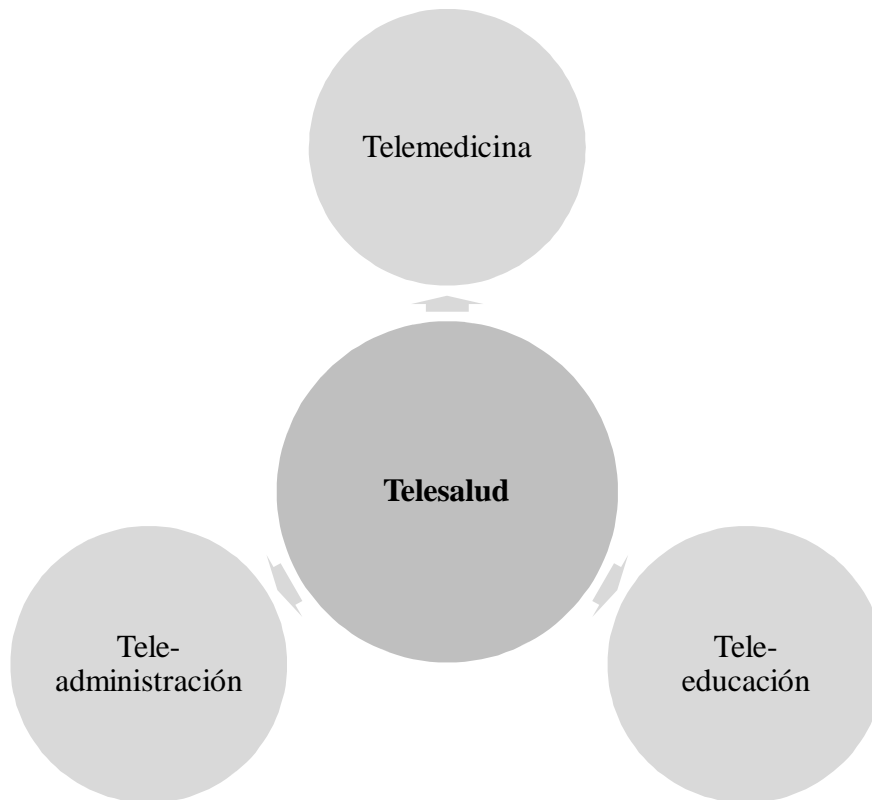


Figura 1. Disciplinas que incorpora la Telesalud.

2.4. Telemedicina

Diferentes Organizaciones e Instituciones a nivel mundial aprovechan los beneficios de las TICs en el campo de la salud y es así como definen Telemedicina:

- “El suministro de servicios de atención en salud, en los que la distancia constituye un factor crítico, por profesionales que apelan a las tecnologías de la información y la comunicación con objeto de intercambiar datos para hacer diagnósticos, recomendar tratamientos, así como prevenir enfermedades y heridas, además de la formación permanente de los profesionales de atención de salud y en actividades de investigación y evaluación, con el fin de mejorar la salud de las personas y de las comunidades en que viven” (Organización Mundial de la Salud, 1977).
- “El uso de las tecnologías de la información y las comunicaciones para proporcionar y apoyar los servicios de atención a la salud cuando la distancia separa a los participantes” (Instituto de Medicina de los Estados Unidos).
- “El intercambio de información médica de un sitio a otro a través de comunicaciones electrónicas para mejorar el estado de salud de los pacientes” (La Asociación Americana de Telemedicina, 2003).
- “El acceso rápido a expertos médicos de manera compartida y remota empleando las telecomunicaciones y las tecnologías de información sin importar la ubicación del paciente o la información relevante” (Comisión Europea en el programa de telemática).
- “El uso de las tecnologías de información y comunicaciones para proporcionar servicios de salud e información independientemente de las barreras de distancia, geográficas, sociales y culturales” (Universidad de Calgary, 1992).

La telemedicina es el intercambio de datos, imágenes, voz y/o video utilizando las Tecnologías de la Información y Telecomunicaciones existentes para proveer servicios de salud entre instituciones médicas.

2.4.1. Servicios de telemedicina

Los servicios que ofrecen las redes de Telemedicina por medio de las TICs se muestran en la Tabla 1 (Aparicio, et al., 2007).

Tabla 1. Servicios de la Telemedicina.

Aplicación	Descripción
Teleconsulta	Servicio que utilizan los médicos que se encuentran en zonas rurales o en unidades médicas de atención primaria para comunicarse con los hospitales en donde se encuentran los especialistas.
Tele-asistencia médica y sanitaria	Como su nombre lo dice, se proporciona asistencia a zonas devastadas por desastres naturales, conflictos armados, etc. en donde se requiera ayuda médica remota con carácter de emergencia sanitaria.
Tele-educación	Este servicio se pone a disposición de instancias educativas para la enseñanza y formación de recursos humanos.

A partir del acercamiento de las nuevas tecnologías de comunicación a las distintas áreas de análisis clínico se ha podido ofrecer una mayor y mejor atención a los pacientes que llevan un tratamiento de rigurosos cuidados, lo que ha facilitado brindar servicios médicos enfocados al bienestar total del usuario o usuarios.

Diferentes especialidades médicas toman como recurso para el diagnóstico de una enfermedad las herramientas de la comunicación por medios electrónicos, lo que habla de un sentido de la vanguardia que permite unificar los servicios de salud a nivel mundial.

Teniendo en cuenta este concepto, las aplicaciones de la Telemedicina en el entorno médico con las que actualmente cuenta nuestro país se muestran en la Figura 2 (Aparicio, et al., 2007).

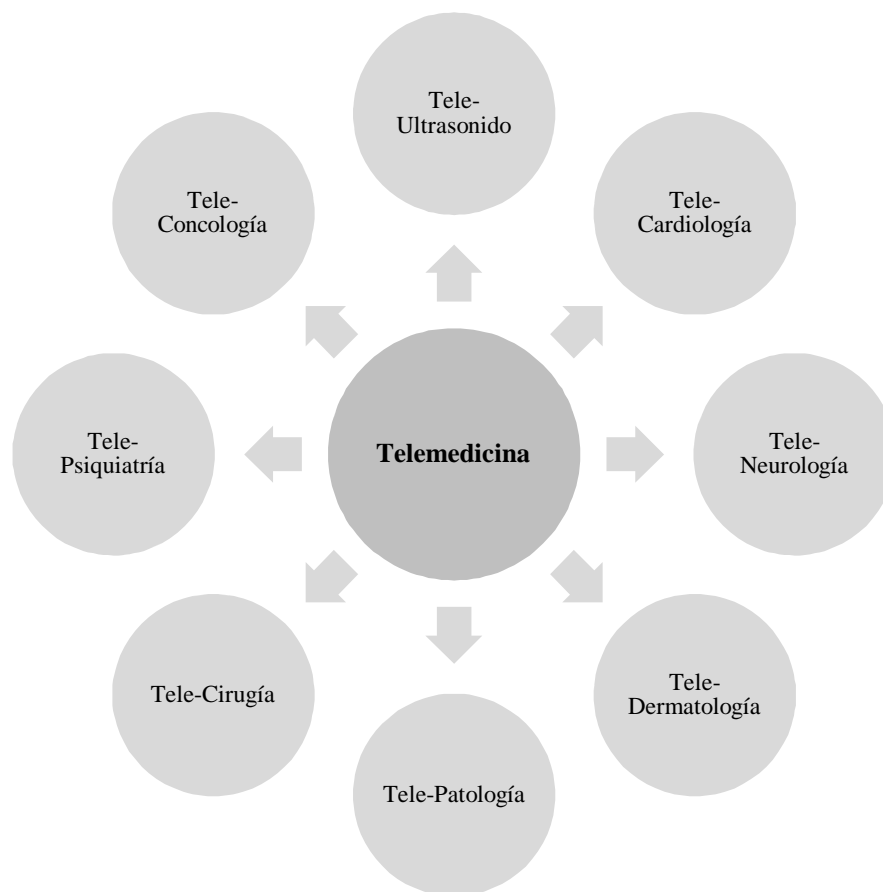


Figura 2. Servicios de la Telemedicina en el entorno médico.

La Tele-Neurología es el área de interés para la elaboración del presente trabajo, encauzado principalmente a la observación de pacientes con problemas de movilidad en sus extremidades así como del rostro, que son causados por distintas afectaciones en el Sistema Nervioso Central (SNC).

2.4.2. Rehabilitación física a distancia

En la práctica de la fisioterapia se entiende que los pacientes que acuden a ella tienen alguna limitación física por lo que la rehabilitación que se lleve a cabo depende de la enfermedad que padezcan. Los problemas que afectan al SNC, requieren de rutinas muy detalladas de ejercicio especiales para su tratamiento por lo que para su transmisión o recepción en video es necesaria la mayor calidad de señal posible.

De acuerdo a la bibliografía consultada, existe la Telerehabilitación asistida por dispositivos electromecánicos controlados a través de la red, destinados a la rehabilitación física, sin embargo este tipo de rehabilitación sólo se puede realizar mediante estos dispositivos (Bae, et al., 2012). Los parámetros de calidad de servicio no están definidos para estándares de transmisión de video digital en aplicaciones vía satélite con propósitos fisioterapéuticos, lo cual ayudaría a determinar los factores que lo afectan para realizar un diagnóstico y seguimiento adecuado del paciente.

Los especialistas en Neurología recomiendan que los casos en que el paciente sea asistido para realizar los movimientos necesarios para el diagnóstico o tratamiento de una enfermedad, es obligatoria la presencia de un fisioterapeuta acreditado para que sea válido el diagnóstico que resulte de la consulta a distancia. La finalidad de dicha rutina es la correcta valoración del paciente para una máxima recuperación.

El medio visual por el cual el especialista basará el tratamiento para el paciente, radica en el contenido del video que reciba en su consultorio, por tal motivo es importante resaltar los beneficios del uso del video en formato digital para tal fin.

2.5. El video como herramienta de diagnóstico

Del uso de los medios electrónicos para fines médicos se obtienen resultados que benefician tanto al paciente como a los expertos en salud; estos beneficios se reflejan en la atención y diagnóstico de las enfermedades así como en los tiempos de recuperación. Uno de los instrumentos que ya forma parte del consultorio clínico de algunos hospitales en México es el equipo de grabación de video para el apoyo de los enfermos y derechohabientes que así lo requieran. Actualmente se cuentan con 18 unidades con tecnología satelital que permiten la comunicación entre hospitales generales, hospitales regionales, clínicas especializadas y el Centro Médico Nacional en la Ciudad de México (Hernández S. , 2009).

La observación y análisis de videos médicos por parte del personal especialista aunado a un historial clínico detallado, una exploración física integral y exámenes de laboratorio que amerite el paciente, permite un diagnóstico fiable para el tratamiento y

seguimiento de diferentes afecciones. Al haber cumplido las etapas anteriormente mencionadas, el especialista tiene las siguientes opciones (Aparicio, et al., 2007):

- Corroborar el diagnóstico del médico local y recomendar un tratamiento y seguimiento.
- No emitir un diagnóstico y recomendar al médico local que se realicen exámenes adicionales para completar el diagnóstico, que serán enviados por vía electrónica (en este caso vía satélite), al centro especializado para su análisis.
- Declarar como necesario un interrogatorio y un examen dirigido vía videoconferencia.
- Trasladar al paciente a una unidad con servicios de segundo o tercer nivel, según sea necesario.

La calidad del video ayudará al especialista a establecer un diagnóstico acertado en base a características propias de la transmisión y recepción del material de análisis, que en este caso son archivos de video capturados en formato digital.

2.6. Estado actual de la telemedicina en México

México cuenta con 18 plataformas de telemedicina conectadas a una red híbrida con conectividad vía satélite (Figura 3), además de 178 equipos con tecnología I.P para dicho propósito, de estas últimas, 59 pertenecen a unidades de primer nivel de atención, 108 a unidades de segundo nivel y 11 a unidades de tercer nivel (Hernández S. , 2009).



Figura 3. 18 Estados de la República que cuentan con Hospitales equipados con tecnología satelital.

Hasta el 2012 se tiene un registro de 14 estados de la República que brindan el servicio de Tele-consulta y 23 de Tele-educación (Figura 4), es decir que aproximadamente el 72% de los Hospitales en distintos estados tienen conexión con otros Centros de Salud en el país como parte del Programa de Telemedicina del Instituto de Seguridad y Servicios de los Trabajadores del Estado (ISSSTE) en México (Secretaría de Salud, 2013).

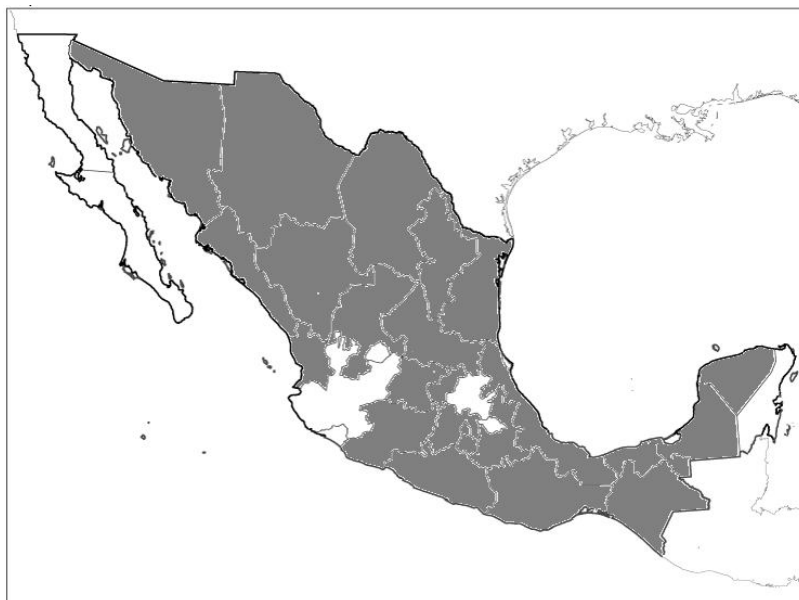


Figura 4. 23 Estados de la República que brindan servicios de Tele-educación en Hospitales incorporados al Programa Nacional de Telemedicina.

Además, por parte de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes que coordina la Red Complementaria Satelital operada por Telecomunicaciones de México se tiene la operación de las redes de telecomunicaciones vía satélite para proporcionar servicios de voz, datos, imagen e internet a través de los Centros Comunitarios y Digitales (CCD's).

La denominada Red 23 es la encargada de dar servicios a los CCD's con conectividad digital vía satélite utilizando el segmento espacial de 54 MHz de la banda Ku, del satélite Satmex 6 con una posición orbital geoestacionaria de 113° W incorporado a la red de satélites operado por SATMEX. En la actualidad existen 923 sitios identificados (CCD's) con el servicio de conectividad satelital de la Red 23 que proporcionan servicios de salud en el país (Coordinación de la Sociedad de la Información y el Conocimiento, 2013) de los cuales 435 pertenecen al Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS) (Telecomunicaciones de México, 2012).

Por otro lado, el Centro Mexicano de Educación en Salud por Televisión (CEMESTEL) brinda educación médica a distancia vía satélite a toda la República Mexicana a través del Canal 26 de la Red Edusat que transmite en formato digital; aquí participan los Institutos y Centros Nacionales de Salud, Hospitales y Academias. El sistema de CEMESTEL transmite utilizando el satélite Satmex 5 con una frecuencia propia otorgada por la SCT y transmite de manera gratuita las 24 horas del día (Secretaría de Salud, 2012).

Capítulo 3

Estándares para video y TV digital

La operación de los sistemas de televisión digital se basa en parámetros descritos por distintos estándares internacionales, así, cada país ha adoptado un estándar para proveer de este servicio a la población. Existen cuatro modos conocidos de transmitir señales digitales de televisión para fines comerciales: por cable, por satélite, por enlaces terrestres o por línea de abonado digital (DSL). Actualmente, las principales familias de estándares que se alojan en los sistemas de televisión digital son las de: DVB en la Unión Europea, Namibia, Panamá, Colombia, Australia, Turquía y Sudáfrica principalmente; ATSC en Norteamérica, El Salvador, Honduras, República Dominicana, Puerto Rico y Corea del Sur; ISDB en Japón, Filipinas, Uruguay, Paraguay, Nicaragua, Costa Rica, Venezuela, Guatemala, Chile, Ecuador, Bolivia, Argentina, Perú y Brasil; así como el DTMB adoptado en China y Cuba (DTV Status, 2013).

Particularmente en la familia del estándar DVB, en la cual destacan el DVB-RCS y el DVB-T para transmisión de señales biomédicas, se tienen aplicaciones orientadas a la salud de la población al proveer servicios de video digital a través de VSATs y tecnología IP como se ha hecho en la India y como lo han hecho la Agencia Espacial Europea y la Agencia Espacial Italiana según (Sangal, Satyamurthy, Bhatia, & Bhaskarnarayana, 2004), (Kocian, et al., 2011) y (Bianchi, Luglio, Marciani, & Zampognaro, 2010) respectivamente, en donde se tiene una arquitectura de red establecida gracias a la colaboración de la academia, la industria e instituciones de salud.

En esta sección se describen los principales estándares que rigen las transmisiones de televisión digital a nivel internacional.

3.1. Digital Video Broadcasting by Satellite (DVB-S)

DVB-S es un estándar internacional adoptado por diferentes países en el mundo tales como Alemania, España, Francia y el resto de la Unión Europea para la transmisión de Televisión en formato digital y en alta definición (HDTV) vía satélite. Dicho estándar

utiliza las bandas FSS y BSS para la distribución de servicios primarios y secundarios de DTV. El sistema brinda servicios como Televisión DTH, SMATV y televisión por cable.

El estándar describe la estructura de las tramas, la codificación de canal y la modulación digital con la cual opera la transmisión de DTV. La codificación y la compresión de video se realizan utilizando MPEG-2 complementando así al sistema, esto permite que se establezca una transmisión síncrona con el multicanalizado de la información de video paquetizada. El aprovechamiento de la técnica del multicanalizado se extiende hasta una variedad de configuraciones de servicios de TV como son servicios de datos y sonido utilizando TDM (European Telecommunications Standards Institute, 1997).

3.2. Digital Video Broadcasting by Satellite – Second Generation (DVB-S2)

DVB-S2 es el sucesor del estándar internacional DVB-S desarrollado por DVB Project y utilizado para brindar el servicio de DTV vía satélite. Entre sus principales características se encuentran:

- Cuatro tipos de modulación disponibles (QPSK y 8PSK utilizadas para aplicaciones en *transponders* satelitales no lineales; 16APSK y 32APSK para servicios interactivos y aplicaciones profesionales).
- Un esquema de FEC (Forward Error Coding) que brinda un excelente rendimiento en presencia de altos niveles de ruido e interferencia. Este mecanismo permite una operación casi libre de errores (Quasi Error-Free) operando en alrededor de 0.7 dB a 1 dB del límite de Shannon, dependiendo del tipo de modulación.
- El uso de la modulación y codificación variable (VCM) con diferentes niveles de protección contra errores de acuerdo al servicio que se proporcione (ej. SDTV, HDTV, audio, etc.) así como también la modulación y codificación adaptativa (ACM por sus siglas en inglés) para aplicaciones interactivas y comunicación punto a punto. ACM ofrece una protección más exacta enfocándose a cada terminal receptora de manera individual (European Telecommunications Standards Institute, 2013).

Además, al igual que la primera generación de este estándar, el sistema utiliza el *Transport Stream* del estándar MPEG para el formato de datos, con esto es posible que exista compatibilidad con diferentes tipos de entrada, como múltiples *Transport Stream* o formatos de datos genéricos, sin un incremento en la complejidad del sistema que implique un cambio significativo.

Lo anterior se refleja en un incremento en la capacidad del sistema de aproximadamente un 30% (con respecto a la primera generación de este estándar) a un determinado ancho de banda y PIRE transmitido, dependiendo del tipo de modulación y la tasa de codificación. En la Tabla 2 (European Broadcasting Union, 2005) se muestran algunas características que diferencian al DVB-S2 del DVB-S.

Tabla 2. Comparación entre DVB-S y DVB-S2 para televisión digital.

<i>PIRE del Satélite</i>	51		53.7	
<i>Sistema</i>	DVB-S	DVB-S2	DVB-S	DVB-S2
<i>Modulación y Codificación</i>	QPSK 2/3	QPSK 3/4	QPSK 7/8	8PSK 2/3
<i>Tasa de Símbolos (Mbps)</i>	27.5 ($\alpha=0.35$)	30.9($\alpha=0.2$)	27.5($\alpha=0.35$)	29.7($\alpha=0.25$)
<i>C/N (en 27.5 MHz) (dB)</i>	5.1	5.1	7.8	7.8
<i>Bitrate (Mbits/s)</i>	33.8	46 (ganancia=36%)	44.4	58.8 (ganancia=32%)
<i>Número de Programas de SDTV</i>	7 MPEG-2	10 MPEG-2	10MPEG-2	13 MPEG-2
<i>Número de Programas de HDTV</i>	1-2 MPEG-2	2 MPEG-2	2 MPEG-2	3 MPEG-2

El sistema ha sido optimizado para las siguientes aplicaciones de banda ancho vía satélite: Televisión de Alta Definición (HDTV) y Servicios de Radiodifusión Digital de TV.

3.3. Digital Video Broadcasting – Return Channel Satellite (DVB-RCS)

El DVB-RCS y el DVB-RCS2 son los estándares de la ETSI diseñados por el DVB-Project, los cuales definen las especificaciones para redes de comunicación satelital interactivas y su uso en VSATs (Very Small Aperture Terminal) que permiten un intercambio de información bidireccional. Las VSAT son equipos de bajo costo que brindan una extensa capacidad de transmisión a un amplio rango de usuarios. DVB-RCS proporciona a sus usuarios servicios de conexión a Internet sin la necesidad de contar con la infraestructura para una estación terrena. Dependiendo de las características específicas de cada enlace satelital y otros parámetros de diseño del sistema, se pueden alcanzar varias decenas de Mbit/s en los enlaces de bajada a las terminales y hasta 10 Mbit/s o más de cada terminal. La primera generación del estándar DVB-RCS es publicado como EN 301 790, mientras que la segunda generación, con mayores prestaciones, DVB-RCS2 es publicada en tres partes como TS 301 545-1, EN 301 545-2 y TS 301 545-3.

En su forma básica, DVB-RCS/RCS2 provee de un tipo de conectividad denominada “*hub-spoke*”, donde las terminales de los usuarios están conectadas a un “*hub*” o terminal central que actúa como un controlador de tráfico entre los usuarios y la red de internet. Las terminales de los usuarios consisten de dos pequeñas unidades, una ubicada en el interior de la casa o complejo y otra en el exterior con una antena cuyo tamaño no supera la de una de DTH TV (Direct-To-Home TV). Como la terminal satelital también transmite datos, la unidad exterior está dotada de un amplificador de potencia de RF.

Las terminales de los usuarios ofrecen conexión IP-sobre-Ethernet para conexiones a Internet interactivas utilizadas en redes locales de hogares u oficinas alcanzando de uno a varios usuarios. Además de proveer servicios DVB interactivos e IPTV, los sistemas DVB-RCS/RCS2 pueden proveer una completa conectividad IP donde exista cobertura satelital.

La parte principal del enlace de bajada a las terminales de los usuarios es el esquema de modulación de tipo MF-TDMA, el cual brinda una alta eficiencia en el ancho de banda para múltiples usuarios. El esquema de asignación por demanda utiliza varios mecanismos que permiten la optimización de diferentes aplicaciones, para que voz, audio, *streaming* de video, transferencia de archivos y navegación en la red puedan ser manejadas eficientemente. DVB-RCS soporta distintos tipos de acceso al medio lo que hace que el

sistema sea mucho más sensible y por lo tanto más eficiente que otros sistemas satelitales de asignación por demanda.

El enlace de subida es compartido entre una población de terminales que utilizan el estándar DVB-S2. La transmisión adaptativa utilizada para vencer las variaciones propias del canal puede ser activada en ambos enlaces, de subida y de bajada (European Broadcasting Union, 2003).

DVB-RCS fue publicado por primera vez en el 2000. La especificación DVB-RCS2 más flexible y eficiente fue terminada en el 2011. En la Tabla 3 (European Broadcasting Union, 2003) se observan las principales diferencias entre DVB-RCS y DVB-RCS2.

Tabla 3. Comparación entre DVB-RCS y DVB-RCS2 para televisión digital

Prestación	DVB-RCS	DVB-RCS2
Control y manejo armonizado	Ninguno	Sí (opcional)
QoS a nivel IP	Ninguno	Sí
Soporte de múltiples redes virtuales	Ninguno	Sí
Seguridad	Solución única	Soporte para múltiples sistemas de seguridad, para aplicaciones con diferentes requerimientos
Acceso al medio para el enlace de retorno	TDMA, portadora continua	TDMA, portadora continua, acceso aleatorio
Esquemas de modulación	QPSK	Lineal: BPSK, QPSK, 8PSK, 16QAM Envolvente constante: CPM
Codificación de canal	Convolutional RS, turbo código *PCCC de 8 estados	turbo código PCCC de 16 estados (modulación lineal), **SCCC (CPM)
Ráfaga de Espectro esparcido	Repetición de ráfaga	Secuencia directa
Adaptabilidad del canal de retorno	Limitado	TDMA y portadora continua
Eficiencia del ancho de banda	N/A	30% más que DVB-RCS

*Concatenación Paralela de Códigos Convolutionales (PCCC por sus siglas en inglés)

**Concatenación Serial de Códigos Convolutionales (SCCC por sus siglas en inglés)

3.4. Advanced Television System Committee (ATSC)

Advanced Television System Committee (ATSC) es la comisión encargada de la creación y el desarrollo de los estándares que regulan la transmisión de televisión en formato digital en Estados Unidos. Además de EE.UU. otros países también han adoptado este estándar (entre ellos México) para los servicios de televisión de alta definición lo que ha permitido la compatibilidad de sistemas de radiodifusión televisiva.

El estándar describe un sistema diseñado para transmitir audio, video y datos sobre un canal de 6 MHz además puede entregar de forma fiable cerca de 19 Mbps de caudal eficaz en un canal de transmisión terrestre y alrededor de 38 Mbps en un canal de televisión por cable. Esto significa que la codificación de una fuente de video cuya resolución puede ser tan alta como cinco veces la resolución de la televisión convencional (NTSC) requiere una reducción de tasa de bit de hasta un 50% (Advanced Television Systems Committee Inc., 2009). Para lograr esta reducción en la tasa de bit, el sistema está diseñado para utilizar de forma eficiente la capacidad del canal explotando la compleja tecnología de la compresión de audio y video.

El objetivo es maximizar la información que es llevada a través del canal de datos minimizando la cantidad de datos requerida para representar la secuencia de imágenes que conforman al video y su audio asociado manteniendo el nivel de calidad requerido para una aplicación dada.

Aunque los subsistemas de transmisión RF descritos en este estándar están diseñados específicamente para aplicaciones terrestres y cableadas, el objetivo es que el video, el audio y los subsistemas de servicio de multiplexado y transporte sean útiles en otras aplicaciones (Advanced Television Systems Committee Inc., 2009).

ATSC utiliza la configuración de Transport Stream de ISO/IEC 13818-1 (MPEG-2 TS) para la compresión de video, es así como logra una notoria eficiencia en la reducción de datos transmitidos para contener la mayor cantidad de información posible.

3.5. Integrated Services Digital Broadcasting (ISDB)

El sistema de Radiodifusión Digital de Servicios Integrados (Integrated Services Digital Broadcasting) es utilizado para brindar servicios de video, sonido y datos de excelente calidad no sólo para transmisiones dirigidas a receptores fijos, sino también, para aparatos móviles. También está diseñado para brindar flexibilidad, capacidad de ampliación e interoperabilidad para radiodifusión multimedia.

Este estándar utiliza codificación de video y codificación de audio avanzado (Advanced Audio Coding AAC) de MPEG-2. Por otra parte, adopta MPEG-2 Systems para el encapsulamiento del flujo de datos. Por lo tanto, distintos contenidos digitales tales como sonido, texto, imágenes fijas y otros datos pueden ser transmitidos simultáneamente. Esto proporciona interoperabilidad con otros sistemas que adopten MPEG-2 Systems.

Las emisiones digitales utilizando radiodifusión satelital comenzaron en Japón en diciembre del 2000. Estas emisiones digitales BS, como son llamadas en Japón, son transmitidas por un sistema de radiodifusión enfocado a la HDTV y a los servicios multimedia. El sistema opera en la banda de los 11.7 a los 12.2 GHz del Servicio de Radiodifusión Satelital, y ha sido estandarizado en la ITU-R como Recomendación BO.1408-1 con el nombre “Sistema de Transmisión para sistemas multimedia avanzados proporcionados por Radiodifusión Digital de Servicios Integrados en un canal de radiodifusión satelital” (Transmission System for advanced multimedia services provided by Integrated Services Digital Broadcasting in a broadcasting satellite channel); está registrado bajo el nombre de ISDB-S en la ITU-R, siendo el segmento satelital de la familia de sistemas ISDB (Katoh, 2006).

Pensando en que el objetivo del sistema es que pueda transmitir múltiples programas de televisión en alta definición con un solo transponder, la parte de codificación de canal del sistema digital BS fue desarrollada desde un punto de vista diferente que aquel de los sistemas de radiodifusión digitales vía satélite convencionales. Nuevas tecnologías, como el esquema de modulación 8PSK (TC8PSK) codificado mediante Trellis, fueron incorporadas para este estándar con el fin de mejorar la capacidad de transmisión y para transmitir múltiples *Transport Streams* (TS) en una sola portadora (Katoh, 2006). Se adoptaron MPEG-2 Video y MPEG-2 Systems para la codificación de video y la

multicanalización, y MULTI-2 para la decodificación. La Tabla 4 (Kato, 2006) muestra las principales características del estándar.

Tabla 4. Características del estándar ISDB-S.

Ancho de Banda (Energía 99%)		34.5 MHz			
Tasa de Información por un transponder		52 Mbps aprox. (en caso de que todos los espacios estén asignados para TC8PSK)			
Sistema de codificación de canal	Esquema de modulación de la Señal Principal	Un máximo de 4 de los 7 sistemas pueden ser utilizados simultáneamente: TC8PSK ($r=2/3$), QPSK ($r=1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8$), BPSK ($r=1/2$)			
	Esquema de corrección de errores de la Señal Principal	Código interno: 8PSK-Trellis; QPSK, BPSK-convolucional Codificación externa: Reed-Solomon (204,188)			
	Dispersión de energía de la Señal Principal	Suma de una señal pseudo-aleatoria de 15° orden de serie M ($X^{15} + X^{14} + 1$); reajustando cada super-trama (8 tramas)			
	Entrelazado de la Señal Principal	Entrelazado con bloques de 8x203 bytes			
	Sistema TMCC (Trainmaster Command Control)	Modulación BPSK, convolucional (tasa de codificación de 1/2), Reed-Solomon (64,48), suma de una señal pseudo-aleatoria de 15° orden de serie M ($X^{15} + X^{14} + 1$)			
	Señal de ráfaga para recuperación de portadora	4 símbolos son insertados cada 203 símbolos de la señal principal en modulación BPSK			
	Roll-off	0.35 con características de Coseno alzado			
Sistema de Acceso Condicional		MULTI-2			
Sistema de Multiplexado		MPEG-2 Systems			
Fuente	Codificación de Video	MPEG-2 Video			
	Formato de Video		Pixeles efectivos	Aspecto	Sistema de escaneo
		1080i	1920x1080	16:9	Entrelazado
		480p	720x480	16:9	Progresivo
		480i	720x480	16:9, 4:3	Entrelazado
		720p	1280x720	16:9	Progresivo
	1080p	1920x1080	16:9	Progresivo	
Codificación de Audio	MPEG-2 Audio (AAC)				

3.6. Compresión de video

Hasta ahora se han descrito los estándares que actualmente existen para la normalización de los sistemas televisivos que ofrecen servicios de video en formato digital así como lo es la televisión de alta definición. Los sistemas con los que operan cada uno de estos estándares tienen algo en común: la codificación de video.

MPEG-2 es el estándar de compresión de video al cual recurren los estándares internacionales para la transmisión de video digital, sin embargo, la familia de MPEG cuenta con otros estándares y técnicas de compresión utilizados en videoconferencia, envío y almacenaje de archivos de video, etc., como MPEG-4 (H.264). MPEG-2 ofrece prestaciones que aprovechan ampliamente las normas de telecomunicaciones en el ámbito de los sistemas televisivos, pero eso no es impedimento para considerar el uso de la nueva versión de este estándar en entornos multimedia.

En esta sección se tratarán los conceptos básicos sobre la compresión de video para dar pie a una explicación más detallada sobre el estándar H.264/MPEG-4.

Existen dos tipos de compresión que definen la calidad del video debido a la integridad de información durante el proceso de codificación; éstas son la compresión sin pérdidas y compresión con pérdidas. El primero de estos dos tipos, supone la recuperación total de la señal que se transmite, esto es que, se recibe exactamente la misma información que se transmite con una calidad idéntica a la de la señal fuente. La compresión con pérdidas se refiere a que es admisible la pérdida de una determinada cantidad de información la cual no es relevante para el sujeto que la recibe, es decir que los datos en la parte receptora del sistema permiten la reconstrucción de la información con la calidad suficiente para que al espectador o al observador le resulte aceptable. Cabe destacar que en esta categoría en la compresión de video no es posible recuperar la señal que contiene la información original a partir de la señal comprimida, lo que implica una distorsión de la señal si se realizan compresiones sucesivas sobre las mismas señales decodificadas.

La tasa de compresión es otro punto importante en la clasificación de estándares y se define por una relación entre la cantidad de datos binarios que se tienen originalmente de un archivo y la cantidad de datos que se obtienen después del proceso de compresión.

La eficiencia de codificación establece una relación entre la mínima cantidad de bits que se utilizan para codificar la información y los bits que realmente se requieren para tal fin, por lo que se expresa como un porcentaje.

Para lograr una eficiencia de codificación mayor, es inevitable que la complejidad de codificación aumente. Esto quiere decir que cuantos menos bits se necesiten para la representación de la información comprimida, mayor será la cantidad de operaciones aritméticas y los requerimientos de memoria afectando así directamente al hardware y al software. El retardo de codificación se ve reflejado en el tiempo que lleva el proceso de compresión, el cual, dependiendo de la aplicación, puede ser un factor crítico o no. Este retardo puede ser dosificado aumentando la velocidad de cómputo, de tal manera que para el observador sea imperceptible, sin embargo, se presenta forzosamente una mayor complejidad en el hardware y el software, resultando un mayor costo.

3.7. H.264/MPEG-4

Los avances en la tecnología de codificación de video han progresado de tal forma que ha surgido la necesidad de un estándar para la compresión de video digital con un significativo incremento en la eficiencia de codificación. Teniendo esto en cuenta, el Video Coding Experts Group (VCEG) de la ITU-T y el Moving Pictures Experts Group (MPEG) de la ISO/IEC formaron el Joint Video Team (JVT) en el año 2001 para el desarrollo de una nueva Recomendación/Estándar Internacional (Telecommunication Standardization Sector of ITU, 2012), fue así que nació la norma H.264 o MPEG-4 Parte 10.

3.7.1. Objetivo del estándar

El propósito del desarrollo de esta nueva Recomendación fue el de crear un estándar capaz de proporcionar una compresión de video digital más alta con una excelente calidad de imagen en comparación con las versiones anteriores (H.262/MPEG-2) para distintas aplicaciones como videoconferencia, almacenamiento de datos en formato digital, televisión digital, etc. (Telecommunication Standardization Sector of ITU, 2012). El

estándar H.264/MPEG-4 está diseñado para que la información codificada pueda ser transmitida y recibida sobre redes de telecomunicaciones existentes y futuras, lo que lo hace bastante versátil para ser utilizado en las aplicaciones que se mencionan en la siguiente sección.

3.7.2. Aplicaciones

Dentro de las principales tecnologías que hacen uso del estándar H.264 para brindar sus servicios, se encuentran:

- CATV (TV por cable) sobre redes ópticas, de cobre, etc.
- DBS (Direct Broadcast Satellite) Servicios de video satelital
- DSL (Digital Subscriber Line) Servicios de video para líneas de suscripción digital.
- DTTB (Digital Terrestrial Television Broadcasting) Servicios de televisión digital terrestres.
- ISM (Interactive Storage Media) Almacenamiento interactivo de archivos multimedia (discos ópticos por ejemplo).
- MMM (Multimedia Mailing) Mensajes multimedia.
- MSPN (Multimedia Services over Packet Networks) Mensajes multimedia sobre redes de paquetes.
- RTC (Real-Time Conversational) Servicios de conversación a distancia en tiempo real
- RVS (Remote Video Surveillance) Videovigilancia remota.
- SSM (Serial Storage Media) Almacenamiento de medios en serie.

3.7.3. Principales características

El funcionamiento de este estándar, se rige principalmente por el diseño de la capa de codificación de video (VCL por sus siglas en inglés) la cual permite la codificación basada en bloques en donde cada imagen que conforma el video está representada por

unidades llamadas macrobloques con muestras de luma y croma asociadas a ellas. Lo que resalta de la VCL es que no ofrece una mejora significativa en la eficiencia de compresión notoria, sino que perfecciona otros aspectos de la codificación que es lo que sustenta su uso.

A continuación se describen las reformas que aporta la VCL en la operación del estándar H.264/MPEG-4.

- Un video codificado en el formato H.264/MPEG-4 está conformado por una serie de imágenes codificadas en una secuencia y cada una de estas imágenes puede representar tanto un cuadro completo como un solo campo de toda una imagen, al igual que en MPEG-2, pero H.264/MPEG-4 por otro lado, especifica en su tipo de codificación una representación geométrica en vez de sincronización en tiempo.
- Toma en cuenta la manera en que el ojo humano percibe una imagen en términos de luminosidad e información del color al tener mayor sensibilidad a los detalles de iluminación que los de color. Separa la representación del color en tres partes llamadas Y o luma que representa el brillo, Cb y Cr que representan dos componentes del croma. Es de esta manera como el sistema realiza un muestreo denominado 4:2:0 con 8 bits de precisión por muestra considerando una extensión en el estándar para soportar una resolución más alta en el croma y una mayor cantidad de bits por muestra que lo diferencie del *Main-profile* de MPEG-2.
- Divide cada una de las imágenes que conforman al video en secciones de tamaño fijo llamadas Macrobloques los cuales cubren un área de 16x16 muestras de la componente luma y 8x8 muestras de cada una de las componentes de croma. Además de introducir particiones de 8x4, 4x8 o 4x4 píxeles, anteriormente sólo se alcanzaban divisiones de 8x8.
- Los Macrobloques son agrupados para formar *Slices* y *Slices Groups* para conformar toda una imagen y de acuerdo a esto, los *Slices* o cuadros se subdividen en I, P y B, codificados de forma tal que toman como referencia a otros cuadros, ya sea de la misma imagen (I) (Figura 5) o de otra anterior o posterior (P y B) (Figura 6) de la secuencia en el video (predicción intra-

cuadro e inter-cuadro respectivamente en los cuadros). La codificación de los cuadros o *Slices SP* (Switching P slice) y *SI* (Switching I slice) que involucran el intercambio de imágenes pre-codificadas, el acceso aleatorio y la recuperación de errores, es la innovación en esta versión del estándar de la ITU-T.

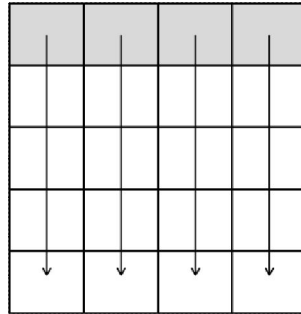


Figura 5. Ejemplo de predicción intra-cuadro (Modo 0 o predicción vertical, donde las muestras que se encuentran encima de un bloque de 4x4 son copiadas en el siguiente bloque como indican las flechas).

- Para proveer mayor eficiencia de codificación en imágenes entrelazadas con regiones que contienen objetos en movimiento y escenas sin movimiento, el diseño de H.264/MPEG-4 ofrece dos métodos conocidos como PAFF (Picture-Adaptive Frame/Field) y MBAFF (Macroblock-Adaptive Frame/Field) cuya intervención en la codificación radica en preservar la coherencia espacial de cada imagen.

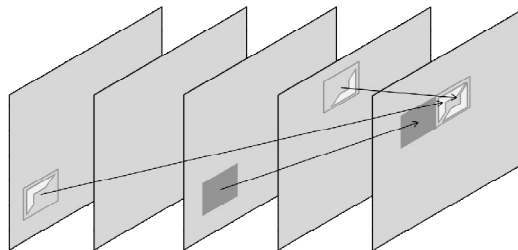


Figura 6. Ejemplo de predicción inter-cuadro donde se toman las características de cuadros anteriores para la codificación del cuadro actual.

- El estándar H.264 realiza una codificación por transformada (DCT de 4x4) de los elementos residuales por las siguientes razones:

- Una DCT de 4x4 elementos remueve eficientemente la correlación innecesaria de los efectos residuales producidos por la codificación de las imágenes, beneficio que se refleja al realizar transformadas de mayor tamaño.
- Produce menor ruido en las orillas de los bloques lo que beneficia a la capacidad de compresión.
- Se requiere de menor capacidad de procesamiento y tiempos de ejecución.
- Soporta dos métodos de codificación entrópica, el CAVLC (Context-Adaptive Variable Length) y el CABAC (Context-Adaptive binary Arithmetic Coding).
- Utiliza un filtro de desbloqueo *in-loop* para los efectos de imprecisión al momento de codificar las orillas de cada cuadro que se forma.
- Garantiza que cualquier decodificador que sea compatible con el estándar, sea capaz de decodificar cualquier video utilizando un modelo de codificación llamado HRD (Hypothetical Reference Decoder).

Una descripción con mayor profundidad sobre el modo de operación del estándar, se podrá encontrar en (Wiegand, Sullivan, Bjontegaard, & Luthra, 2003).

3.7.3.1. Capa de abstracción de red (NAL)

La Capa de Abstracción de Red o NAL por sus siglas en inglés (Network Abstraction Layer) es la parte del estándar que se ocupa de adaptar la información de video codificada a la red por la cual va a ser transmitida o al dispositivo de almacenamiento que se tenga disponible. La forma en que se modifica el contenido de los videos de tal modo que puedan ajustarse a una aplicación en particular no es específicamente una característica de la NAL, sin embargo, está diseñado para utilizarse en una amplia gama de servicios. El acondicionamiento de la señal de video ha permitido que en este estándar se tenga una mejora significativa en la tasa de transmisión, comparado con los estándares anteriores.

3.7.3.2. Unidades NAL

La información que resulta de la codificación del video se organiza en paquetes de datos denominados unidades NAL, los cuales están conformados por una cantidad entera de bytes.

El tipo de datos que contiene cada unidad NAL está indicado en el primer byte y el resto de los bytes contienen la información útil del video. La estructura de cada unidad NAL permite su uso en sistemas de transmisión de paquetes y en sistemas orientados al streaming de bits.

3.7.3.3. Unidades NAL en formato Byte-Stream

Algunos sistemas requieren que las unidades NAL sean transmitidas y recibidas como un flujo ordenado de datos divididos en bits o bytes identificando el principio y el fin de cada paquete de tal forma que dentro de la misma información se encuentre el patrón de codificación para poder reconocer cada una de las unidades NAL. Existen los llamados prefijos inicio de código que consisten básicamente de tres bytes que antecede a cada unidad NAL para definir un formato de flujo de datos y que son los únicos que identifican el inicio de una nueva unidad NAL. Con el fin de establecer una sincronía en sistemas que proporcionan streams de bits, también es añadido un byte de datos por imagen de video.

3.7.3.4. Unidades NAL en formato de Sistema de Transporte de paquetes

En otros sistemas (sistemas IP/RTP por ejemplo), la información codificada se transmite en paquetes formados según el protocolo de transporte del sistema y la identificación de los límites de las unidades NAL dentro de los paquetes que se pueden formar sin utilizar patrones de prefijo de inicio de código. En dichos sistemas, la inclusión de los prefijos resultaría en un gasto de la capacidad de transmisión de datos. Así que en este caso las unidades NAL pueden ser transportadas en paquetes de datos sin prefijos de inicio de código.

3.7.3.5. Unidades NAL VCL y no VCL

Las unidades NAL se clasifican en unidades VCL y no VCL. Las unidades NAL VCL contienen datos que representan los valores de las muestras de las imágenes de video, y las unidades NAL no VCL contienen cualquier información adicional como conjuntos de parámetros (datos de cabecera que hacen referencia a un conjunto de unidades NAL VCL) e información de refuerzo suplementaria (información de sincronización y otros datos complementarios que pueden brindar un mayor aprovechamiento de la señal de video decodificada)

3.8. Comparación de herramientas con H.262/MPEG-2

Es conveniente hacer un paréntesis en la descripción del estándar H.264/MPEG-4 para conocer la versión que le antecede, el H.262/MPEG-2, ya que las ventajas que presenta este nuevo estándar se derivan de las funciones principales del H.262/MPEG-2 lo que permite la versatilidad de los sistemas de radiodifusión en formato digital, ya sea para servicios de video, audio, datos o imágenes. A continuación se muestra en la Tabla 5 una comparación de los más importantes aditamentos de cada uno de los estándares (Goldman, 2010).

Tabla 5. Tabla comparativa de MPEG-2 Video (H.262) y MPEG-4 AVC (H.264).

Herramienta	MPEG-2 Video (H.262)	MPEG-4 AVC (H.264)
Predicción Intra	<ul style="list-style-type: none"> • Ninguna: Codificación en Macro Bloques • Coeficientes de DC 	<ul style="list-style-type: none"> • Espacial 4x4 • Espacial 16x16 • I_PCM
Tipo de Codificación de Imagen	<ul style="list-style-type: none"> • Por Cuadro • Por Campo • Imagen AFF 	<ul style="list-style-type: none"> • Por Cuadro • Por Campo • Imagen AF • MB AFF
Tamaño de Bloque para Compensación de Movimiento	<ul style="list-style-type: none"> • 16x16 • 16x8, 8x16 	<ul style="list-style-type: none"> • 16x16 • 16x8, 8x16 • 8x8 • 8x4, 4x8 • 4x4

Tabla 5. Tabla comparativa de MPEG-2 Video (H.262) y MPEG-4 AVC (H.264).
(Continuación).

Precisión del Vector de Movimiento	<ul style="list-style-type: none"> • Pixel Completo • Medio Pixel 	<ul style="list-style-type: none"> • Pixel Completo • Medio Pixel • Un cuarto de Pixel
Cuadro P	<ul style="list-style-type: none"> • Un cuadro de referencia 	<ul style="list-style-type: none"> • Un cuadro de referencia • Múltiples cuadros de referencia
Cuadro B	<ul style="list-style-type: none"> • Un cuadro de referencia en cada sentido 	<ul style="list-style-type: none"> • Un cuadro de referencia en cada sentido • Múltiples cuadros de referencia • Modos Directo y Directo Especial • Predicción Ponderada
Filtros In-Loop	<ul style="list-style-type: none"> • Ninguno 	<ul style="list-style-type: none"> • De-Blocking
Codificación Entrópica	<ul style="list-style-type: none"> • VLC 	<ul style="list-style-type: none"> • CAVLC • CABAC
Transformada	<ul style="list-style-type: none"> • DCT de 8x8 	<ul style="list-style-type: none"> • DCT de Coeficientes Enteros de 4x4 • DCT de Coeficientes Enteros de 8x8
Otros	<ul style="list-style-type: none"> • Matrices de Escala de Cuantificación 	<ul style="list-style-type: none"> • Matrices de Escala de Cuantificación

3.9. Comunicación satelital y telemedicina

En la compresión de video para aplicaciones de telemedicina es fundamental que durante el proceso no se corrompa la integridad del video de manera significativa ya que los errores en los detalles de la imagen pueden llegar a ser mal interpretados, limitando así el establecimiento de un diagnóstico adecuado. Además de esto, son necesarias altas tasas de compresión junto con tiempos de cómputo cortos debido a la enorme cantidad de videos con contenido médico y a las restricciones en cuanto al almacenamiento y la transmisión (Centro Nacional de Excelencia Tecnológica en Salud, 2011).

El desarrollo de los sistemas dirigidos a la transmisión de video con contenido médico se ha beneficiado de los avances en la tecnología de compresión de video y la infraestructura para redes inalámbricas.

La tendencia de los sistemas de comunicación satelital incluidos en las tecnologías de la información y comunicaciones que actualmente se están aplicando en las redes de telemedicina se están enfocando en la interoperabilidad de sus diseños con distintos propósitos, es decir que, las organizaciones dedicadas a la salud pública contemplan en sus planes de desarrollo dar cobertura a toda la población, sobrepasando barreras geográficas y tecnológicas (Centro Nacional de Excelencia Tecnológica en Salud, 2011).

La actualización de los estándares para su uso en la transmisión de video, como es el caso de H.264/MPEG-4, permite que exista una mayor capacidad de desempeño y una escalabilidad en la técnica de compresión, es así como una creciente cantidad de aplicaciones médicas pueden ser tratadas a distancia, sin la necesidad de realizar consultas presenciales médico-paciente.

Los servicios de Tele-consulta, Tele-educación, Tele-diagnóstico, solo por mencionar algunos, son la manera en que el personal médico aprovecha las redes de comunicación satelital que incorporan estándares adoptados por Hospitales de Especialidades, Clínicas-Hospital, Hospitales Generales y Regionales, etc. de acuerdo a las normas de Telecomunicaciones del país en que se encuentran.

Capítulo 4

Implementación de modelos de simulación

En este capítulo se abordan los elementos que conforman el modelo del enlace de comunicación, haciendo énfasis en el papel que desempeñan en la simulación de transmisión de video como un conjunto de parámetros variables para la obtención de resultados bajo distintas condiciones, de manera que se conozca el comportamiento de los parámetros de calidad de servicio implementados utilizando muestras de video comprimido con la técnica de compresión de H.264/MPEG-4.

4.1. Modelo del enlace de comunicación

El modelo de simulación que se contempla en esta tesis, incorpora las partes que a continuación se describen en apartados subsecuentes. Es importante destacar que cada una de estas partes se define tomando en cuenta las necesidades del sistema en su conjunto para cada uno de los escenarios de simulación del Capítulo 5. En la Figura 7 se muestra el diagrama a bloques del sistema de comunicación en el cual está basado el enlace satelital para la transmisión de video.

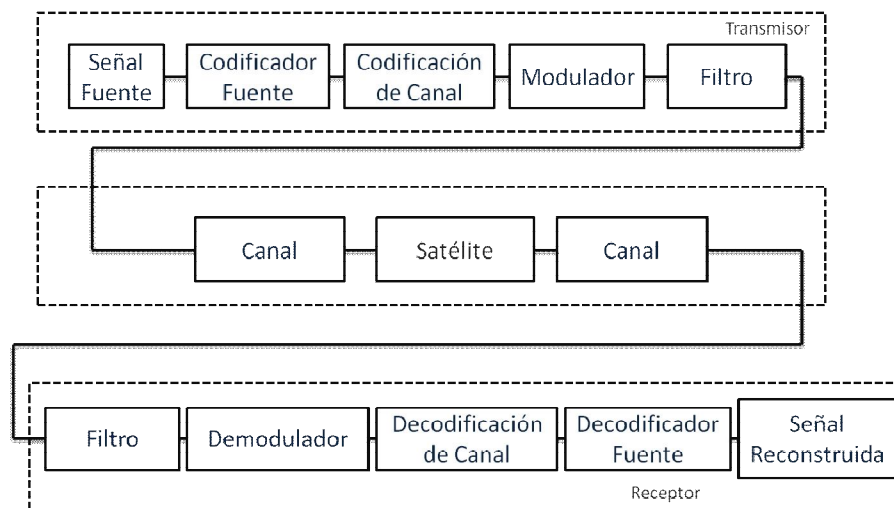


Figura 7. Diagrama a bloques del enlace de comunicación.

Se puede observar en la Figura 7 al transponder como parte del canal de transmisión, que hace la función de repetidor en el satélite; además se establece un modelo AWGN (Additive White Gaussian Noise) para representar el comportamiento del medio de comunicación sobre la información transmitida añadiendo ruido a la señal.

4.1.1. Etapa de transmisión

En la etapa transmisora del enlace se establece el paso de la señal por cada una de las partes que conforman a la estación terrena a partir de la fuente de video, es decir, los cambios que sufre la información para adecuarla a una transmisión aérea de larga distancia. En secciones subsecuentes se describen cada una de las partes de la etapa de transmisión.

4.1.1.1. Señal fuente

El contenido médico de las muestras de video incluye atención a pacientes donde el movimiento va desde pequeños desplazamientos hasta una gran actividad dentro de un mismo cuadro, esto permitirá que los parámetros de calidad de servicio proporcionen mayor información sobre el enlace en el cual se realiza la comunicación entre el médico y el especialista. Las características del tipo de video que se utilizaron para los experimentos, se enlistan en la Tabla 6.

Tabla 6. Características de la muestra de video

Parámetro	Dato
Tamaño de imagen	480x720 líneas
Alto	480 líneas
Ancho	720 líneas
Tasa de cuadros	30 fps
Bits por pixel	24 bpp
Formato de video	H.264/MPEG-4

Los bits son encapsulados en paquetes de 187 bytes agregando otro más para sincronización de acuerdo al MPEG Transport Stream (Telecommunication Standardization Sector of ITU, 2012) como se muestra en la Figura 8.

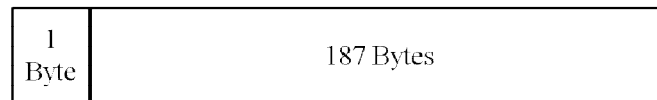


Figura 8. Paquete de MPEG Transport Stream

Los datos se encapsulan de esta manera debido a que MPEG-Systems define el tamaño del paquete conteniendo 188 bytes en total y dependiendo del sistema que se utilice, es la cantidad de bytes que se agregan para la protección de la información.

4.1.1.2. Codificación fuente

La codificación fuente en el sistema de comunicación juega un papel importante para el uso de los recursos del enlace, ya que se reduce la cantidad de información enviada sin comprometer la calidad de la señal. Además, es fundamental que el contenido médico de los videos sea de la mayor claridad posible, por lo que aplicando la técnica de compresión basada en bloques que utiliza el estándar H.264/MPEG4 se obtiene una tasa de compresión diferente para cada tipo de video a transmitir, siendo que esta varía dependiendo de la cantidad de movimiento que se presenta en las imágenes que conforman la totalidad del video, consiguiendo así tasas de compresión que no perjudican la integridad de la información. En la Figura 9 es posible observar la segmentación de los macrobloques y de los bloques de tamaño 8x8 para la compensación de movimiento.

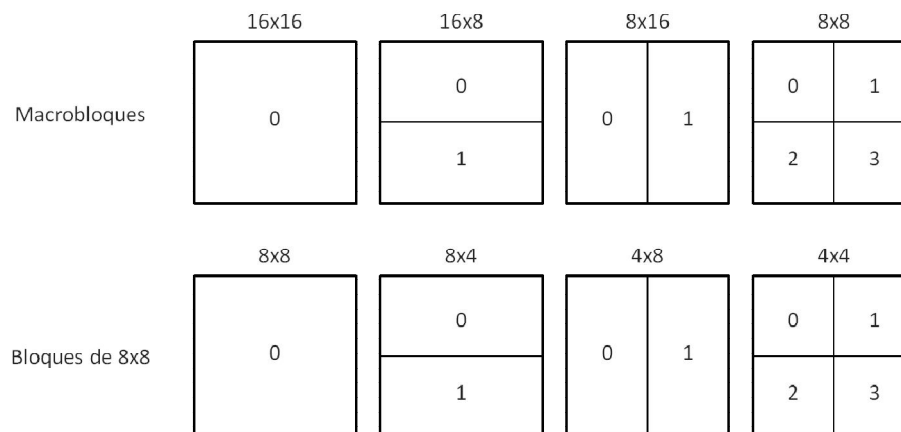


Figura 9. Compresión basada en bloques de H.264/MPEG-4.

En esta sección de la etapa transmisora se conoce la información útil que será transmitida vía satélite.

4.1.1.3. Codificación de canal

Apoyándose en la codificación convolucional, se utiliza el método de Trellis para la codificación de canal del sistema lo que permite establecer valores de FEC (Forward Error Coding) de $1/2$, $2/3$ y $3/4$.

La modulación codificada de enrejado o TCM (Trellis-Coded Modulation) es una técnica de gran uso para la codificación de canal en distintos sistemas de transmisión de datos sustentada por el mecanismo de corrección de errores que a pesar de encapsular los términos modulación y codificación como aspectos independientes, en la TCM se combinan.

La TCM combina dos funciones, la codificación convolucional con una tasa de $R = k/(k + 1)$ y un mapeo de señal que acepta $M = 2^k$ puntos de muestra de entrada llevando a la salida una constelación de $M = 2^{k+1}$ muestras, como se ilustra en el esquema general de la TCM en la Figura 10 (Langton, 2013).

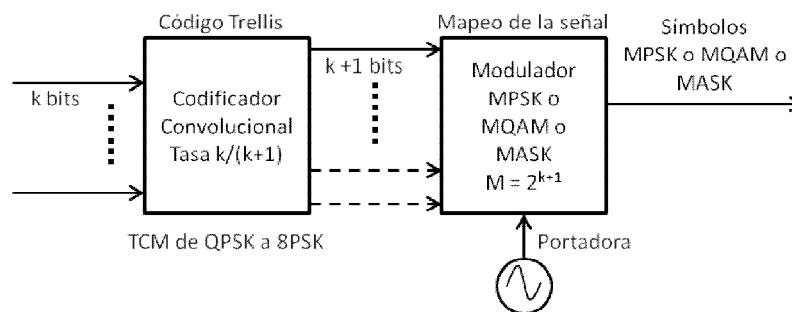


Figura 10. Esquema de la TCM.

Por ejemplo, para una entrada $k = 2$, se tiene un código de tasa $2/3$ que toma una señal QPSK ($M = 4$) y a la salida se obtiene una señal 8 PSK ($M = 8$), por lo tanto, en vez de ampliar el ancho de banda de la señal, se doblan los puntos de muestra de la constelación, como se muestra en la Figura 11 (Langton, 2013).

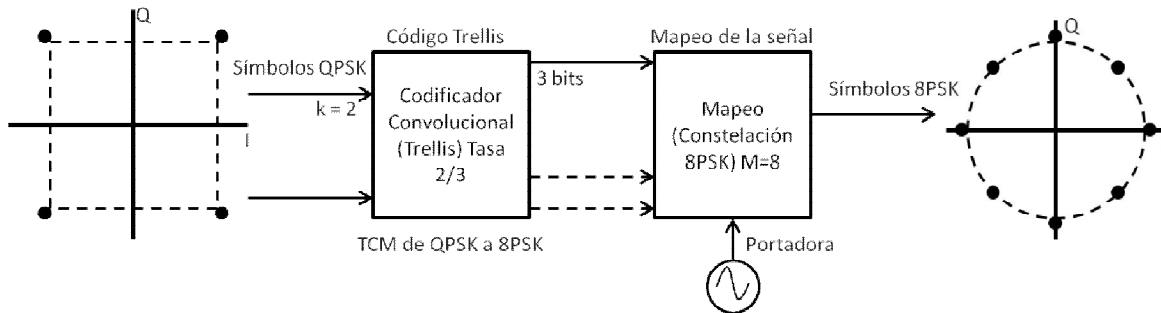


Figura 11. Función de la TCM para una señal QPSK con una tasa de 2/3 y salida 8PSK.

La codificación de canal cumple con tres propósitos sustanciales para la transmisión de datos una vez que han pasado por la codificación fuente, los cuales garantizan una mayor calidad en el enlace. El primero de ellos es proteger la información ante posibles daños provocados por la degradación en el canal de transmisión; en segundo lugar, añadir redundancia que resguarde los datos de una forma sistemática y por último, detectar y corregir errores que genera el canal.

Partiendo de este punto, la cantidad de datos se incrementa debido a la redundancia añadida, sin embargo, el compromiso de robustecer la información reduciendo el desempeño del enlace, permite una mayor seguridad en los datos en la etapa de recepción.

4.1.1.4. Modulación digital

Una parte muy importante para la transmisión de información a través del espacio ahora con los sistemas de comunicación digital más recientes, es el esquema de modulación que se emplea, ya que distintos tipos de modulación digital ofrecen prestaciones que resaltan sobre otras en determinados escenarios de aplicación; por ejemplo, la ventaja de un esquema de modulación PSK (Phase Shift Keying) radica en la potencia de símbolo, ya que es la misma en cualquiera de sus modalidades (BPSK, QPSK, OQPSK, SOQPSK, etc.) por lo cual tiene un impacto sobre el diseño de los amplificadores y otras etapas del sistema, convirtiéndolo en un esquema ideal para la protección contra errores. Por otro lado, la modulación QAM (Quadrature Amplitude Modulation) también ofrece un rendimiento que permite la transmisión de señales satelitales y de televisión aprovechando todo el ancho de

banda disponible en el canal, además de que proporciona altas tasas de transmisión al utilizar la TCM.

En el presente trabajo de investigación, se consideran tres esquemas de modulación, QPSK (Quadrature Phase Shift Keying), 16QAM (Quadrature Amplitude Modulation) y 8PSK (Phase Shift Keying) los cuales, de acuerdo a la bibliografía consultada (European Telecommunications Standards Institute, 1997), (European Telecommunications Standards Institute, 2013), (Katoh, 2006) y (European Broadcasting Union, 2003), son los esquemas básicos adoptados por los estándares de DTV que actualmente se encuentran alrededor del mundo. La Figura 12 ilustra las constelaciones que despliegan cada uno de los tipos de modulación considerados en los modelos de simulación.

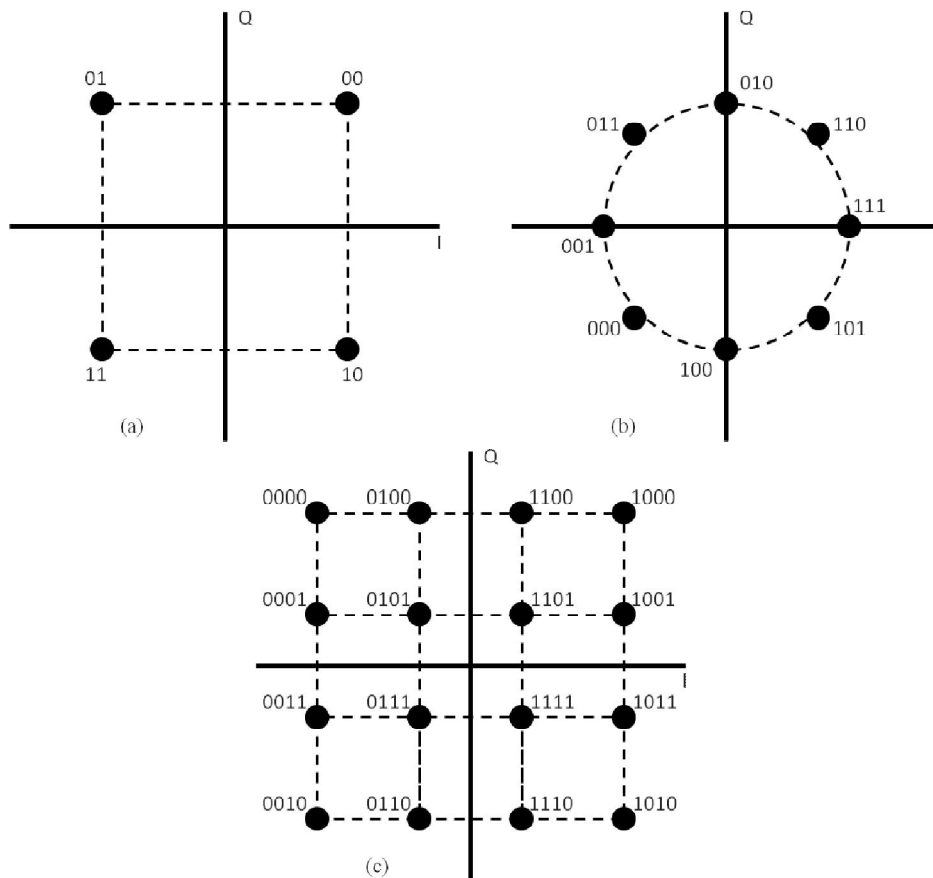


Figura 12. Constelación de los esquemas de modulación (a) QPSK, (b) 8PSK y (c) 16QAM.

4.1.1.5. Filtro transmisor

El filtro en el sistema de comunicación tiene dos propósitos: su implementación como filtro pasa bajas y reducir la interferencia inter símbolos (ISI) producida por la modulación digital. El tipo de filtro utilizado tanto para la etapa de transmisión como para la de recepción, es el filtro de coseno alzado que es ampliamente conocido en sistemas de comunicación satelital. El factor de *roll-off* (β) que caracteriza a este tipo de filtro digital, va desde 0.25 a 0.35, según los valores que se utilizan para los distintos estándares de DTV y que en esta tesis se incorpora a los valores de simulación. Asimismo, son 8 el número de muestras por símbolo que se utilizan para representar a la señal. En la Figura 13 se presentan las diferentes formas del pulso del coseno alzado con diferentes valores de roll-off.

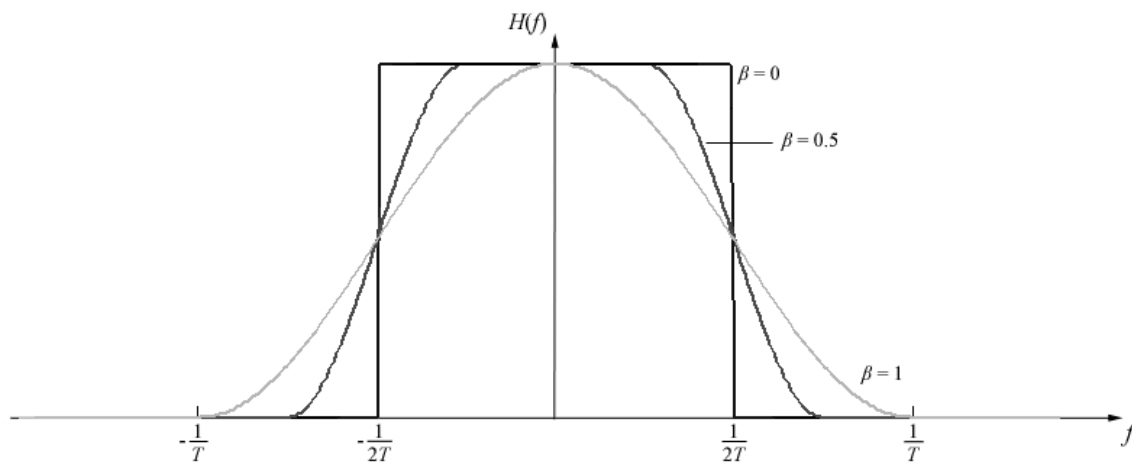


Figura 13. Forma del pulso del coseno alzado en el dominio de la frecuencia con $\beta = 0$, $\beta = 0.5$ y $\beta = 1$.

4.1.2. Etapa de recepción

Esta etapa del enlace, es un proceso en el cual se debe tener en cuenta que los datos han sido corrompidos por el medio de transmisión, ya que en la pérdida de datos provocada por el canal están coludidos factores externos al sistema como las condiciones atmosféricas de la Tierra. La reconstrucción de la señal en la etapa de recepción del enlace es el proceso inverso y simétrico a la etapa de transmisión conservando el mismo ciclo: el filtro receptor,

la demodulación digital, la decodificación de canal y finalmente la reconstrucción y adquisición de la señal.

Al obtener la información transmitida, se registra la calidad de servicio en el enlace a partir de los parámetros de QoS descritos más adelante en el apartado 4.2.

4.2. Parámetros de calidad de servicio (QoS)

La calidad de servicio en las redes de telecomunicaciones garantiza en gran medida la satisfacción de los usuarios que se benefician de ellas, razón por la cual el concepto que engloba este término da lugar a la subjetividad. Tomando esto en cuenta, la Rec. E.800 de la ITU-T, define a la calidad de servicio (QoS) como: “La totalidad de las características de un servicio de telecomunicaciones que determinan su capacidad para satisfacer las necesidades explícitas e implícitas del usuario del servicio”. Básicamente, la calidad de un servicio incorpora métricas que aportan información útil para las compañías de telecomunicaciones, en cuanto a su mejora continua, y así lograr una mayor satisfacción en los consumidores. La calidad en el servicio de transmisión de video y de datos en general enfrenta diferentes problemas, motivo por el cual, se definen parámetros que cuantifican y regularizan una comunicación a larga distancia a través de una red de telecomunicación determinada, en este caso, la comunicación satelital. En los siguientes apartados se definen los parámetros de calidad de servicio que se tomaron en cuenta para la realización de esta tesis, los cuales son: caudal eficaz (*throughput*), latencia, variación del retardo (*jitter*), tasa de pérdida de paquetes (PLR) y tasa de error de bit (BER).

Los modelos matemáticos presentados en las siguientes secciones se tomaron de (García, 2007) a partir de los cuales se realizaron las simulaciones pertinentes para la obtención de los parámetros de calidad de servicio.

4.2.1. Caudal eficaz

El total de datos que son enviados a través de un canal de comunicación se ve alterado de una forma u otra, ya sea por el medio en el que viajan o por el sistema en sí,

considerándose como datos perdidos. Los paquetes de información que se reciben exitosamente se expresan mediante un porcentaje, a esto se le conoce como caudal eficaz.

La Ecuación 1 permite calcular el porcentaje de los paquetes recibidos de forma exitosa, en donde PR_x es el total de paquetes recibidos y PT_x es el total de paquetes enviados.

$$C = \frac{PR_x}{PT_x} \times 100 \quad (1)$$

El caudal eficaz también nos habla del desempeño del canal de comunicación así como del propio sistema, por lo que dependiendo del contexto en el que se ubique, el caudal eficaz también es medido en bits por segundo (bps) cuando coloquialmente se habla de ancho de banda.

4.2.2. Latencia

Al tiempo que tarda un paquete desde que abandona la fuente en la parte transmisora hasta que llega a su destino en el receptor dentro de una red se le denomina latencia. Ya que los datos pasan por distintas etapas, se debe tomar en cuenta la suma de los retardos que producen cada una de ellas para calcular el tiempo total de latencia. La Ecuación 2 permite calcular la latencia del sistema de comunicación.

$$L = \sum_{i=1}^N T_i \quad (2)$$

La Ecuación 2 engloba los retardos que producen las siguientes etapas del modelo: codificación, transmisión, acceso al medio, propagación, recepción y decodificación; los cuales se describen en las siguientes secciones.

4.2.2.1. Retardo por codificación/decodificación

El retardo por codificación y decodificación varía de acuerdo a los códecs que se utilicen así como del desempeño del equipo en cuanto a la velocidad de procesamiento, sin embargo, para el caso de este trabajo de tesis, se prescinde de este retardo ya que las muestras de video son pre-codificadas por un codificador externo al sistema de transmisión simulado, el FFmpeg, teniendo así, los datos listos para ser transmitidos en cada escenario. En el Anexo A se describen las características del codificador utilizado.

4.2.2.2. Retardo por transmisión/recepción

Este tipo de retardo se obtiene a partir de la relación del tamaño de los paquetes con la tasa de transmisión que se describe en la Ecuación 3.

$$L_t = \frac{T_p}{R_t} \quad (3)$$

De donde T_p es el tamaño de cada paquete, R_t es la tasa de transmisión de los datos y L_t es el retardo por transmisión el cual también se aplica para la parte receptora del sistema. Tomando en cuenta que la tasa de paquetes perdidos está directamente relacionada a este parámetro, es conveniente que se examine a pesar del poco contraste que represente comparado con su semejante en propagación.

4.2.2.3. Retardo por acceso al medio

Las técnicas de control de acceso al medio más comúnmente utilizadas para las comunicaciones digitales se centran en tres clases principalmente: CDMA, TDMA y FDMA. Para efecto de esta tesis, se considera que la asignación del canal para la comunicación con el satélite es completamente fija ya que el usuario dispondrá de todo el ancho de banda, por lo tanto el método de acceso al medio utilizado es el SCPC que esencialmente es FDMA, es por esto que el retardo por acceso al medio es nulo.

4.2.2.4. Retardo por propagación

La distancia que recorre la señal, ya sea de la estación terrena al satélite o viceversa, es un factor importante en un enlace de comunicación satelital ya que son distancias de varios miles de kilómetros. El retraso por propagación es el que tiene mayor impacto en el modelo del enlace para satélites geoestacionarios, tomando en cuenta los siguientes aspectos: la distancia de la estación terrena al satélite (d_S), el ángulo de elevación (El), la altura de la órbita satelital (h_S), el radio del centro de la Tierra a la órbita satelital (r_S) y el radio de la Tierra (r_E). En la Figura 14 (García, 2007) se observa a cada uno de los elementos que influyen en el retardo por propagación y que son necesarios para el cálculo del mismo.

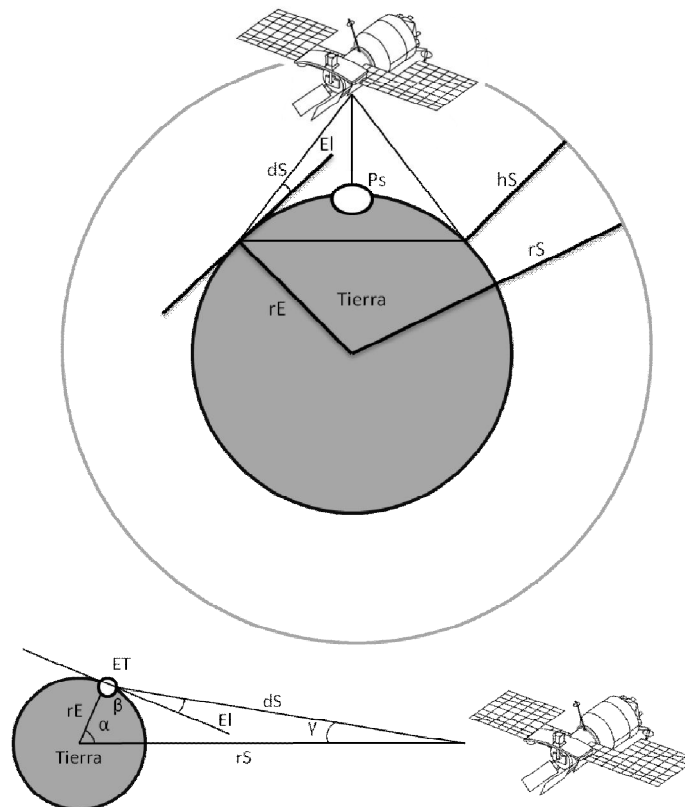


Figura 14. Parámetros para el cálculo del retardo por propagación.

Para obtener el retardo por propagación es necesario calcular primero el ángulo α formado por la distancia entre el centro de la Tierra y el satélite con el radio de la Tierra usando la Ecuación 4.

$$\cos \alpha = \cos(\text{lat}_{ET}) \times \cos(\text{long}_{sat} - \text{long}_{ET}) \quad (4)$$

Donde lat_{ET} es la latitud de la estación terrena, long_{ET} es la longitud de la misma y long_{sat} es la longitud del satélite. A partir de la Ecuación 5 se calcula la distancia entre la estación terrena y el satélite.

$$d_{ET-sat} = r_s \sqrt{1.02274 - 0.301596 \cos \alpha} \quad (5)$$

Una vez que se tiene la distancia entre la estación terrena y el satélite en uso, se emplea la Ecuación 6 para encontrar el retardo por propagación causado por la ubicación geográfica de la estación.

$$t_{ET-sat} = \frac{d_{ET-sat}}{v} \quad (6)$$

4.2.3. Variación del retardo

La variación del retardo o *jitter*, como también se le llama, consiste en la variación en el dominio temporal de un retardo dado sobre una señal digital. Utilizando un DDL (Digital Delay Line) se obtiene un modelo para este parámetro el cual.

4.2.4. Tasa de pérdida de paquetes

Conocida como PLR por sus siglas en inglés (Packet Loss Rate), la tasa de pérdida de paquetes se define por una relación entre la cantidad de paquetes perdidos en el enlace y los transmitidos, expresada por un porcentaje. La Ecuación 7 la describe, donde PP son el total de paquetes perdidos en el enlace y PT_x son los paquetes transmitidos.

$$PLR = \frac{PP}{PT_x} \times 100 \quad (7)$$

4.2.5. Tasa de bit erróneo

Parte de la calidad del enlace satelital es determinada por la tasa de bit erróneo o BER (Bit Error Rate) que hace referencia a la cantidad de errores de bit que se reciben por el total de bits transmitidos, esto quiere decir que, si por ejemplo, en una secuencia de 10 bits transmitidos existen 4 errores recibidos, el BER, para este caso, es de 0.4 o 40%.

De acuerdo a las aplicaciones, que en este trabajo de tesis se tienen establecidas, un BER de 10^{-6} es un valor adecuado para transmitir servicios de video a través de un enlace vía satélite según pruebas realizadas por (Pierucci & Del Re, 2000) para telemedicina.

Las simulaciones para los escenarios establecidos en la siguiente sección fueron realizadas a partir de las ecuaciones que se presentaron en el presente apartado utilizando Matlab y Simulink para la obtención de resultados.

Capítulo 5

Simulaciones y análisis de resultados

5.1. Introducción

Tras haber definido en el Capítulo 4 las ecuaciones y los conceptos necesarios para la realización de las simulaciones, en el presente capítulo se exponen los resultados obtenidos a partir de una serie de consideraciones planteadas para un análisis integral de la calidad del servicio del sistema de comunicación.

Es importante recalcar que, el ambiente de simulación en el cual se desarrollaron las pruebas, no fue un simulador de redes de comunicación en sí, sin embargo, incorpora las herramientas suficientes para la obtención de resultados fiables.

5.2. Escenario de simulación

A continuación se definen las condiciones bajo las cuales se realizaron las simulaciones para medir el rendimiento del sistema de comunicación propuesto.

El enlace satelital establecido como canal de transporte se realiza entre dos estaciones terrenas descritas en la Tabla 7.

Tabla 7. Ubicación de las estaciones terrenas

Localidad	Latitud	Longitud
Ensenada, B.C., México	31.87° N	116.61° O
Cd. de México, D.F.	19.41° N	99.14° O

El satélite mexicano Satmex 6, puesto en órbita desde mayo del 2006, es el considerado para la realización de las simulaciones; sus especificaciones se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Especificaciones del satélite Satmex 6.

Posición Orbital	113° O
Bandas de Frecuencia	C y Ku
Carga Útil	36 Transponders de 36 MHz
Polarización	Lineal

Para la obtención de los tiempos de retardo en el enlace de comunicación, fueron necesarios los datos de orientación angular de acuerdo a la ubicación de las estaciones terrenas y del satélite los cuales se describen en la Tabla 9.

Tabla 9. Orientación de los enlaces de subida y de bajada entre Ensenada y Cd. de México.

	Enlace de Subida	Enlace de Bajada
α	32.05°	23.70°
Elevación	52.68°	62.26°
Azimut	173.22°	148.46°
Distancia al Satélite	36 929.67 Km	36 432Km

De acuerdo a la Tabla 9, la estación terrena emisora es la ubicada en la ciudad de Ensenada, B.C. y en la Cd. de México se ubica la receptora.

En las Recomendaciones UIT-T F.700 y UIT-T G.1010 del (Sector de Normalización de las Telecomunicaciones de la UIT, 2000) y (Sector de Normalización de las Telecomunicaciones de la UIT, 2001) respectivamente, se describen tanto los atributos propios de un enlace de comunicación como los objetivos en cuanto a calidad de funcionamiento del mismo para aplicaciones de audio y video, los cuales se tomaron como base para establecer una referencia útil en la obtención de resultados confiables.

Así mismo, en la Rec. UIT-R BO.1516-1 del (Sector de Radiocomunicaciones de la UIT, 2012) aparecen las características de los sistemas de televisión digital transmitidos vía satélite, a partir de donde se definieron las propiedades de las etapas de comunicación del sistema.

5.3. Análisis de resultados

Se muestran los resultados obtenidos en gráficas que describen la tasa de pérdida de paquetes y el caudal eficaz de la información transmitida con diferentes códigos convolucionales los cuales realizan la función de corrección de errores hacia adelante (FEC) bajo tres distintos esquemas de modulación; todo lo anterior sometido a un SNR que va desde 1 dB hasta los 10 dB. Así mismo, se presenta la latencia total del enlace.

Conociendo que un indicador de la integridad de cualquier sistema de comunicación digital es la tasa de errores de bit, al final de cada sección se presenta una gráfica representativa de los bits que se recibieron de forma errada.

A continuación se muestra el análisis comparativo entre los distintos escenarios de simulación propuestos para la obtención de resultados.

5.3.1. Escenario A con modulación QPSK (FEC 1/2)

Para este y los escenarios subsecuentes se especifican el caudal eficaz y la tasa de paquetes perdidos de acuerdo a lo planteado en el apartado 5.3. En la Figura 16 se muestra la curva que describe el porcentaje de paquetes recibidos exitosamente con respecto al nivel de SNR del sistema, donde se observa que en los 6 dB se tiene un 99.57% de información recibida sin errores y en adelante se tiene el 99.9% de datos recibidos de forma exitosa. Con un valor mínimo de 1 dB se tiene que un 35% del total de la información enviada se pierde por afectación en el canal.

A partir de los 6 dB en el nivel de SNR, la pérdida de paquetes es menor al 0.5% por lo que 6 dB o menos no es adecuado para el sistema. De los 8 dB en adelante, la tasa de paquetes perdidos permanece en un porcentaje menor al 0.01%.

La Figura 15 permite identificar los puntos donde la tasa de datos recibidos exitosamente, se aproxima al 100% dependiendo del valor del SNR.

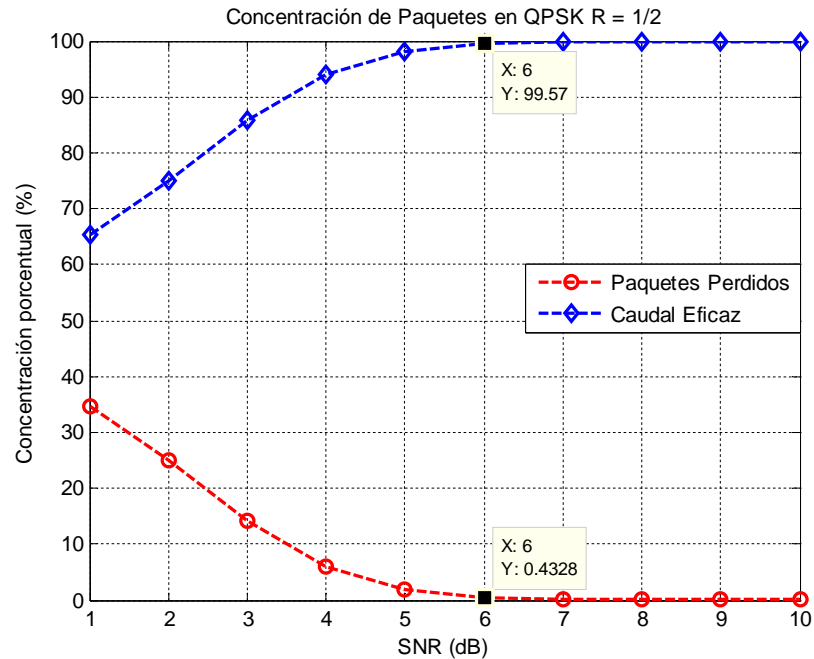


Figura 15. Porcentaje de paquetes perdidos y tasa de datos recibidos exitosamente en QPSK con una tasa de 1/2.

Dado que el contenido del video utilizado para los distintos escenarios propuestos, incluido el presentado en esta sección, es de poca movilidad, el porcentaje de paquetes perdidos durante el enlace es reducido debido a que el tamaño de los paquetes se mantiene constante lo que por consecuencia permite que el caudal eficaz del enlace sea mayor e influye directamente en la continuidad del video al presentar no presentar congelamientos.

5.3.2. Escenario B con modulación 8PSK (FEC 1/2)

La modulación bajo un esquema 8PSK presenta un caudal eficaz 0.17% menor que su similar en QPSK cuando el sistema se ve afectado por un SNR de 6 dB, sin embargo, se tiene una pérdida gradual de datos menor, entre 1 dB y 5 dB, en un esquema de modulación 8PSK que en QPSK como se observa en la Figura 16.

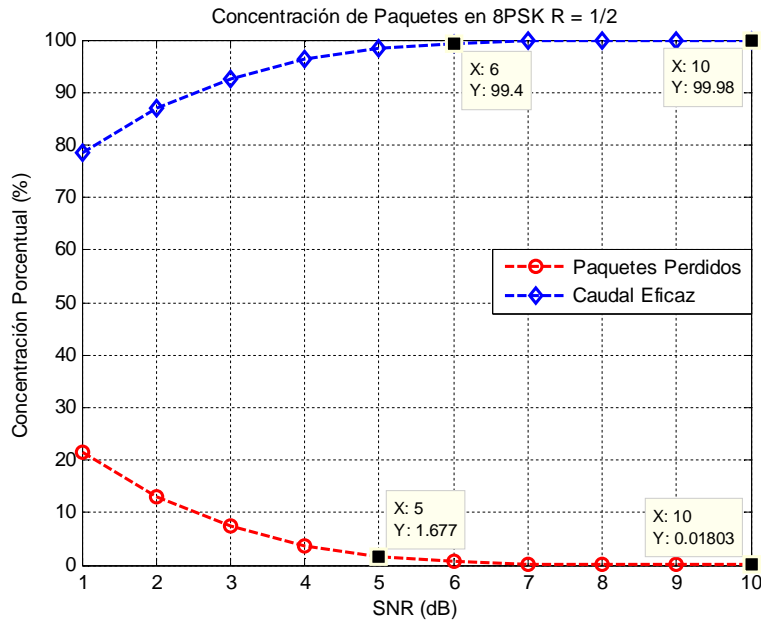


Figura 16. Porcentaje de paquetes perdidos y tasa de datos recibidos exitosamente en 8PSK con una tasa de 1/2.

La Figura 16 muestra como sólo cerca del 80% de la información recibida es exitosa con un SNR de 10 dB.

La pérdida de paquetes en una modulación 8PSK y una tasa de FEC de 1/2 nos hablan de un desempeño eficiente del sistema ya que la curva de comportamiento de la pérdida de información revela una reducida cantidad de datos perdidos comparada con el caso del Escenario A con QPSK, entre 1 dB y 5 dB de SNR. El esquema 8PSK que transmite 8 símbolos representando 3 bits cada uno, separados entre sí 45° , se torna más susceptible al ruido y a la interferencia por la cercanía entre símbolos, sin embargo, el sistema refleja un mejor desempeño que QPSK .

5.3.3. Escenario C con modulación 16QAM (FEC 1/2)

Observando un mejor rendimiento en el enlace, al modificar el esquema de modulación utilizado, ahora en el Escenario C se tiene una modulación de amplitud en cuadratura de 16 estados presentando una mejora en cuanto a la información que se merma por el canal AWGN.

En la Figura 17 se observa que con 1 dB se reciben los datos con un 27.2% de errores alcanzando el 1% hasta los 5 dB (un salto de 1 dB en comparación con la modulación QPSK).

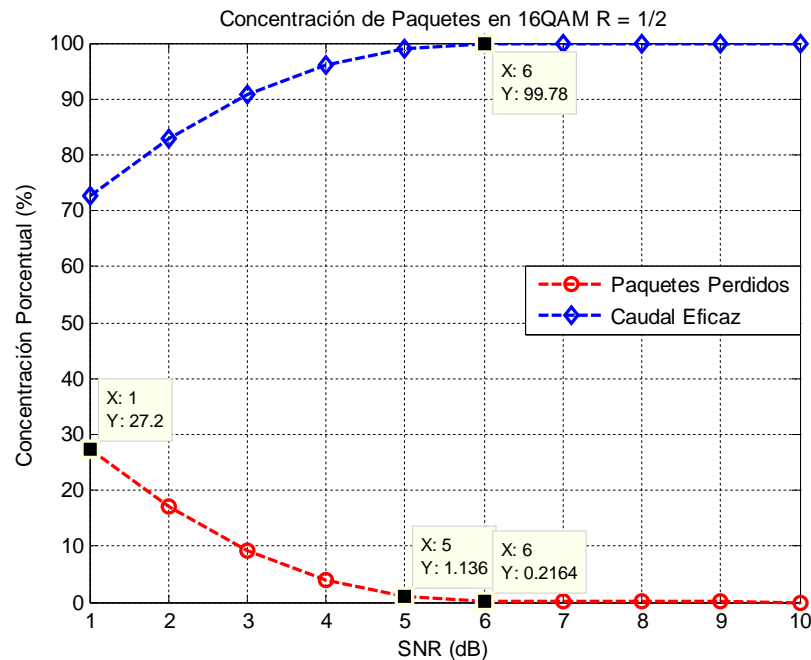


Figura 17. Porcentaje de paquetes perdidos y tasa de datos recibidos exitosamente en 16QAM con una tasa de 1/2.

En cuanto a los datos recibidos sin alteraciones en su contenido, se observa en la Figura 17 que cerca del 99.8% de los datos se obtienen con un SNR de 6 dB, lo que nos habla de un mejor desempeño en comparación con una modulación QPSK.

El sistema 16QAM presenta una menor resistencia ante el ruido y la interferencia que el de QPSK debido a que los símbolos se encuentran más cerca unos de otros. Una comparación entre los distintos escenarios se encuentra en la sección 5.3.4.

5.3.4. Comparación de los escenarios A, B y C (FEC 1/2)

Evaluando la calidad del enlace desde el punto de vista de la tasa de errores de bit, en la Figura 18 se muestran las curvas que definen el BER con una tasa de corrección de

errores de 1/2 para los tres esquemas de modulación propuestos. Se observa que el sistema presenta un mejor rendimiento bajo un esquema de modulación 16QAM que sus similares QPSK y 8PSK.

Al seleccionar un FEC de 1/2 en una transmisión satelital, la capacidad de corregir errores es la máxima que se puede aplicar al tener un bit de corrección por cada par de bits que son transmitidos, en algunos sistemas es utilizado ampliamente debido a la reducida complejidad de los codificadores.

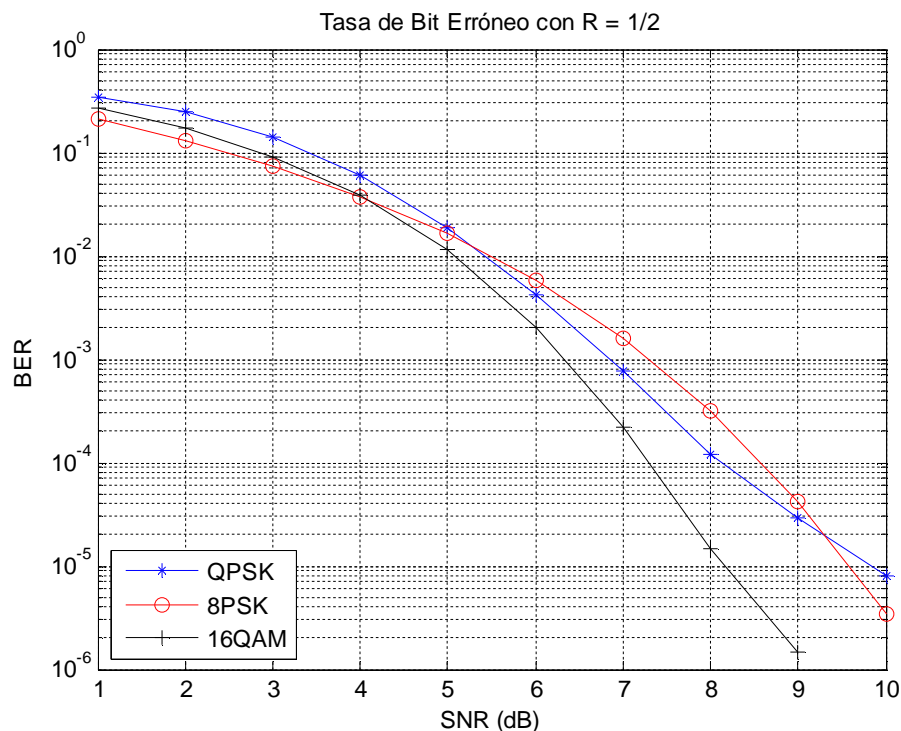


Figura 18. BER para una tasa de 1/2 en QPSK, 8PSK y 16QAM.

En la Tabla 10 se tiene un resumen de los valores críticos en los parámetros de calidad obtenidos.

Tabla 10. Tasa de pérdida de paquetes, caudal eficaz para la modulación QPSK, 8PSK y 16QAM con una tasa FEC de 1/2.

6 dB	QPSK		8PSK		16QAM	
FEC	TPP	CE	TPP	CE	TPP	CE
1/2	0.43%	99.57%	0.6%	99.4%	0.21%	99.78%

5.3.5. Escenario A con modulación QPSK (FEC 2/3)

Ahora para el Escenario A de esta sección, se ha modificado la tasa de corrección de errores que brinda la codificación de canal al pasar de 1/2 a 2/3. En la Figura 19 se observa el comportamiento de los datos conforme se incrementa el SNR pasando de un 44.47% de datos perdidos con el mínimo de SNR (1 dB) a un 0.79% con 7 dB aplicados al sistema.

La Figura 19 muestra que por encima del 99% de los datos recibidos de forma exitosa se perciben con un SNR de 7 dB, mientras que el 55.5% de la información se recibe libre de errores con 1 dB.

Una tasa FEC de 2/3 ahora implica una menor robustez en el sistema ya que por cada tres bits que se transmiten, se genera un par bits de redundancia.

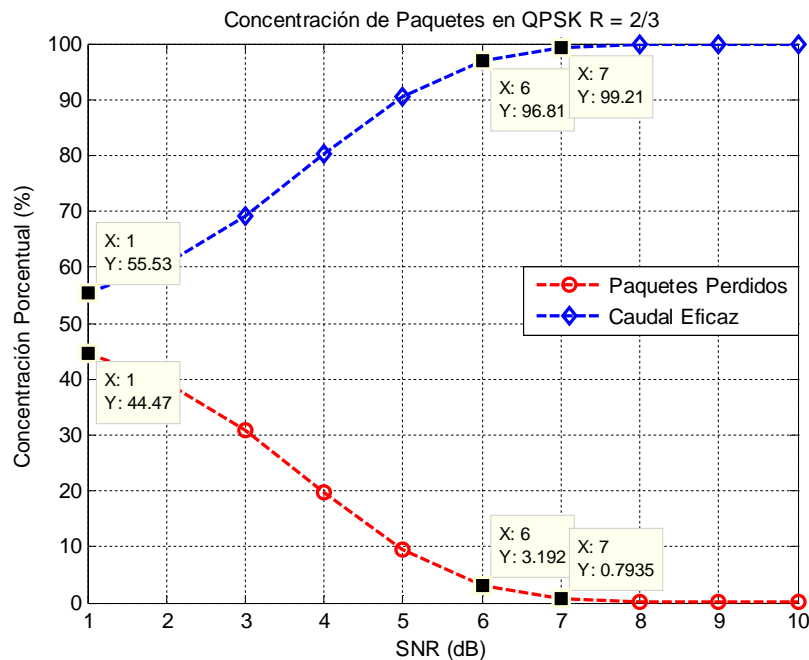


Figura 19. Porcentaje de paquetes perdidos y tasa de datos recibidos exitosamente en QPSK con una tasa de 2/3.

5.3.6. Escenario B con modulación 8PSK (FEC 2/3)

En el Escenario B con una tasa de corrección de errores de 2/3, bajo un esquema de modulación 8PSK, se tiene un recuperación del 72.05% de los datos con 1 dB en el SNR y 99.71% con 6 dB habiendo una mejora de 0.31% con respecto al sistema sometido a una tasa de corrección de errores de 1/2. En la Figura 20 se observa lo anteriormente descrito.

La curva mostrada en la Figura 20 denota una pérdida de un 0.2885% de la información con 6 dB en el factor SNR lo cual describe un desempeño comparable con un esquema 16QAM a una tasa FEC de 1/2 que sobrepasa el 0.2% de los datos perdidos.

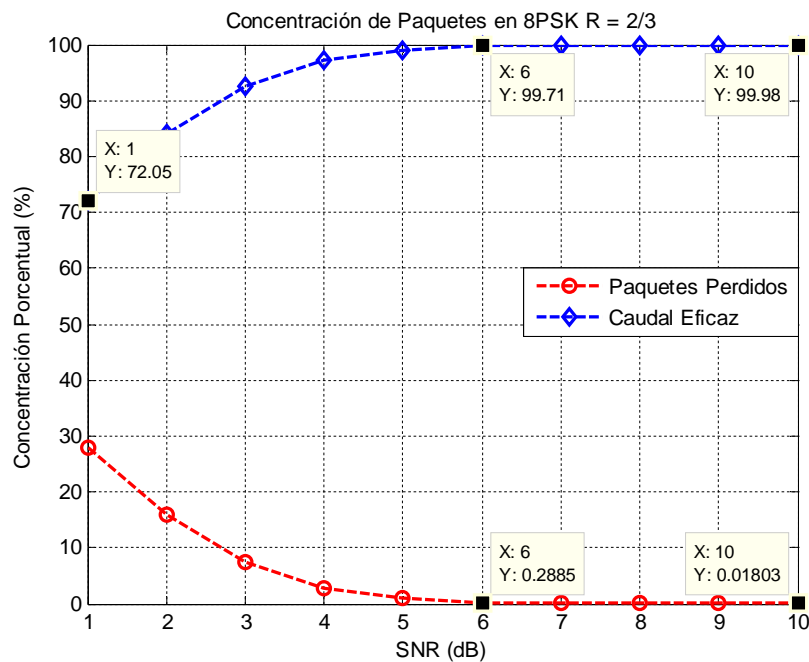


Figura 20. Porcentaje de paquetes perdidos y tasa de datos recibidos exitosamente en 8PSK con una tasa de 2/3.

5.3.7. Escenario C con modulación 16QAM (FEC 2/3)

Pasando al Escenario C con una modulación 16QAM, se obtuvo la curva de la Figura 21 donde se observa una tendencia similar en el porcentaje de la pérdida de paquetes que su similar en QPSK pero con una de FEC de 1/2. En este caso se presenta una pérdida de 0.59% para 6 dB cumpliendo con una pérdida menor de 1%.

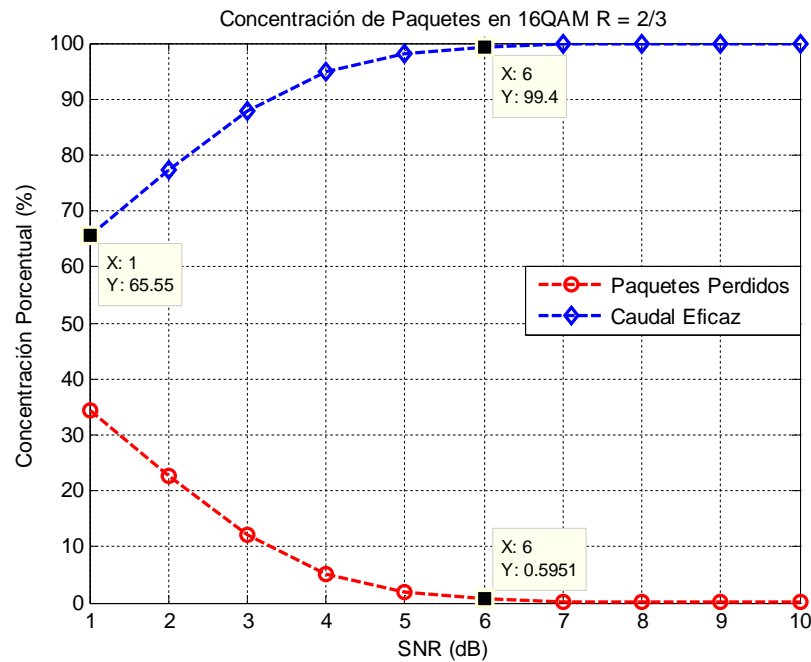


Figura 21. Porcentaje de paquetes perdidos y tasa de datos recibidos exitosamente en 16QAM con una tasa de 2/3.

El caudal eficaz obtenido bajo este esquema de modulación se representa por la curva de la Figura 21 donde se registra un 99.4% de paquetes sin errores en la etapa receptora del sistema con un SNR de 6 dB, reflejando una tendencia en este valor para definirlo como un punto crítico en las tasas de datos recibidos sin errores.

5.3.8. Comparación de los escenarios A, B y C (FEC 2/3)

De igual forma que en la sección 5.3.4, en la Figura 22 se presenta una familia de curvas que describe la calidad del enlace en cuanto a la tasa de bits erróneos y que en esta ocasión ubica como mejor opción el sistema modulado mediante un esquema 8PSK.

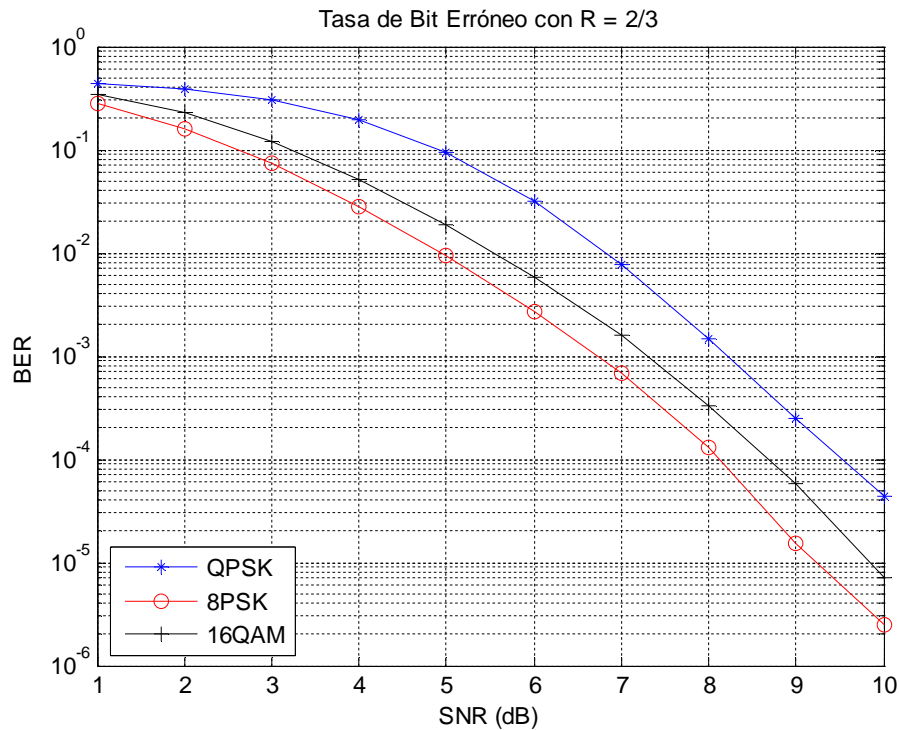


Figura 22. BER para una tasa de 2/3 en QPSK, 8PSK y 16QAM.

La Figura 22 permite observar que, de forma consecutiva, el esquema de modulación QPSK es sobrepasado por la modulación 8PSK y 16QAM con valores de BER cercanos a los 10^{-6} para un SNR de 10 dB.

En la Tabla 11 se enlistan los valores representativos de los Escenarios A, B y C con una tasa de corrección de errores de 2/3.

Tabla 11. Tasa de pérdida de paquetes, caudal eficaz para la modulación QPSK, 8PSK y 16QAM con una tasa FEC de 2/3.

6 dB	QPSK		8PSK		16QAM	
FEC	TPP	CE	TPP	CE	TPP	CE
2/3	3.19%	96.81%	0.28%	99.71%	0.59%	99.4%

5.3.9. Escenario A con modulación QPSK (FEC 3/4)

En esta sección, la tasa de corrección de errores cambia a un valor de 3/4 para cada uno de los esquemas de modulación propuestos.

La Figura 23 permite observar una pérdida de paquetes de datos de 46.89% para un SNR de 1 dB, mientras que el umbral inferior se extendió hasta los 8 dB para alcanzar un valor menor al 1% en la tasa de paquetes perdidos.

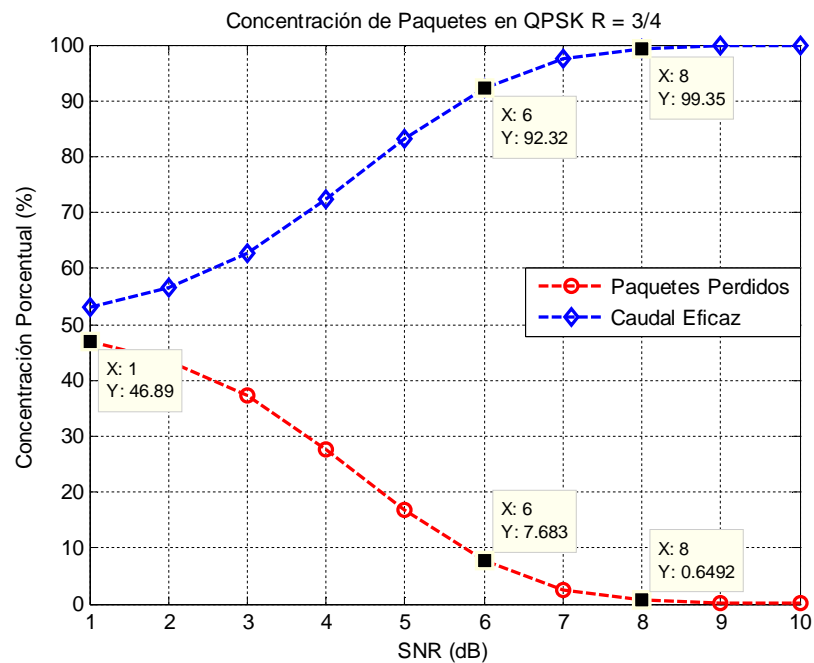


Figura 23. Porcentaje de paquetes perdidos y tasa de datos recibidos exitosamente en QPSK con una tasa de 3/4.

En cuanto al caudal eficaz obtenido en esta prueba, la Figura 23 muestra que se recibió el 99.35% de los datos sin sufrir ninguna alteración con un SNR de 8 dB, y por otra parte, con 1 dB, se recibió un 53.11%, 2.42% menos que su similar con una tasa de 2/3.

5.3.10. Escenario B con modulación 8PSK (FEC 3/4)

Como se ha observado en las pruebas anteriores con las tasas de corrección de errores de $1/2$ y $2/3$, para el caso de la modulación 8PSK, se genera una mejora gradual en cuanto a la tasa de pérdida de paquetes y al BER. En el presente escenario el sistema desarrolla una pérdida de datos de 0.52% a un SNR de 6 dB y un caudal eficaz de 65.25% con un SNR de 1 dB. Lo anterior es mostrado en la Figura 24.

El sistema bajo este esquema de modulación en particular presenta una disminución en el caudal eficaz de entre 6% y 7% conforme se incrementa la tasa de corrección de errores en el margen de 1 dB en el SNR, sin embargo, los porcentajes cercanos a los 6 dB en la pérdida de datos permanecen inferiores al 1%.

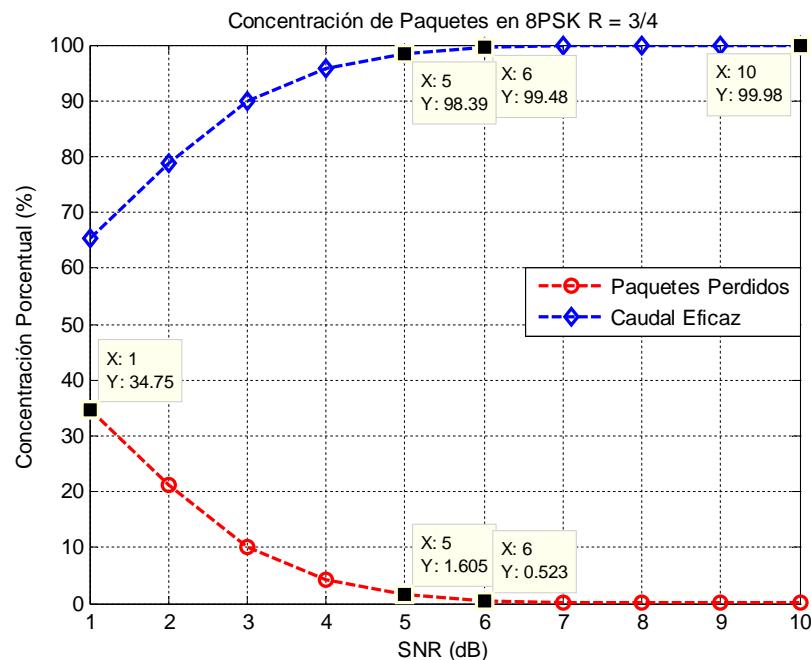


Figura 24. Porcentaje de paquetes perdidos y tasa de datos recibidos exitosamente en 8PSK con una tasa de $3/4$.

5.3.11. Escenario C con modulación 16QAM (FEC 3/4)

Finalmente para el Escenario C con un esquema de modulación 16QAM y una tasa de corrección de errores de $3/4$, se observa en la Figura 25 una pérdida del 50.1% de los paquetes transmitidos y un 1.01% para 1 dB y 6 dB del nivel en el SNR respectivamente, lo

que denota un comportamiento constante en este tipo de modulación para las tres tasas de corrección de errores.

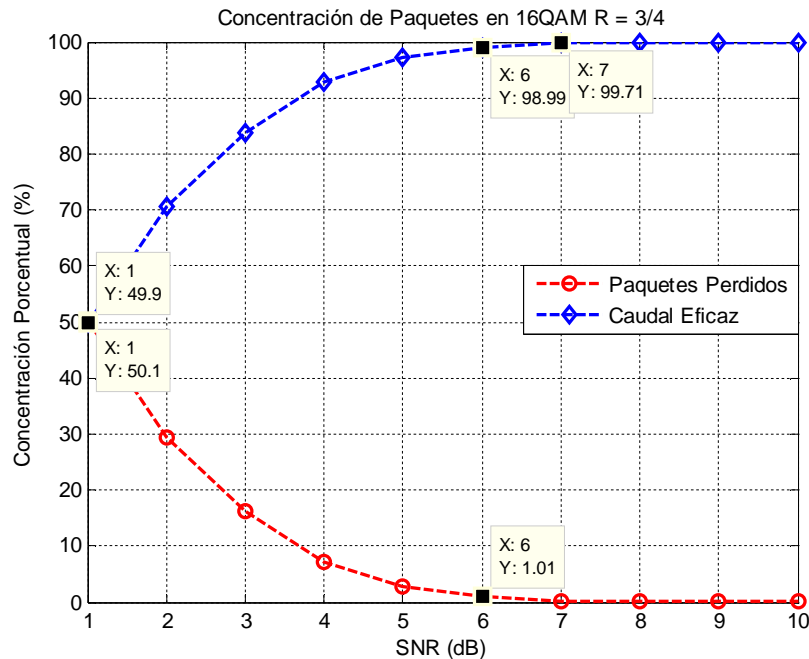


Figura 25. Porcentaje de paquetes perdidos en 16QAM con una tasa de 3/4.

Para el caso del caudal eficaz en este escenario, se alcanzó un 99.71% de los datos recibidos exitosamente con 7 dB en el valor del SNR como se aprecia en la Figura 25. 49.9% de los datos se recibieron de forma exitosa partiendo de 1 dB en la relación señal a ruido. El porcentaje de paquetes sin errores en la recepción, se estabiliza después de los 7 dB garantizando un 99.9% de la información de manera íntegra.

5.3.12. Comparación de los escenarios A, B y C (FEC 3/4)

De forma complementaria a los datos obtenidos mediante las tasas de pérdida de paquetes y el caudal eficaz en cada uno de los casos anteriores, se presenta una gráfica comparativa en las tasas de bits erróneos de acuerdo a cada uno de los esquemas de modulación considerados pero ahora con una tasa de FEC de 3/4. En la Figura 26 se observa el desempeño del enlace, según el BER, en la cual resalta la curva descrita por la

modulación 16QAM que permanece como el mejor esquema de modulación de acuerdo a lo observado en las pruebas con las tasas de FEC de 1/2 y 2/3.

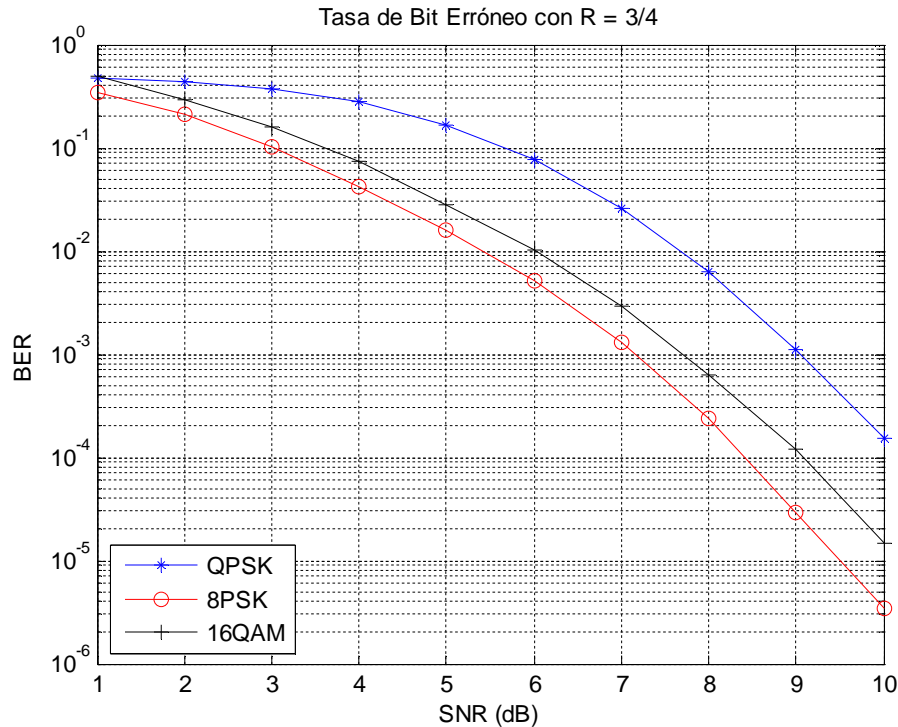


Figura 26. BER para una tasa de 3/4 en QPSK, 8PSK y 16QAM.

En la Tabla 12 se enlistan los valores representativos de los Escenarios A, B y C con una tasa de corrección de errores de 3/4.

Tabla 12. Tasa de pérdida de paquetes, caudal eficaz y latencia para la modulación QPSK, 8PSK y 16QAM con una tasa FEC de 3/4.

6 dB	QPSK		8PSK		16QAM	
FEC	TPP	CE	TPP	CE	TPP	CE
3/4	7.68%	92.32%	0.52%	99.48%	1.01%	98.99%

La tasa de FEC de 3/4 es la más comúnmente utilizada por el estándar DVB-S y DVB-S2 para las transmisiones vía satélite siendo que a mayor cantidad de bits de codificación, el esquema de corrección de errores es mejor, aún así se requiera un ancho de banda mayor (por lo tanto un mayor costo) en el canal satelital.

5.3.13. Latencia

Dado que el retardo por transmisión/recepción que sufren los datos al ser transmitidos por el canal satelital depende del tamaño de los paquetes en que son divididos, la latencia total del sistema permanece con un valor constante debido a que los paquetes transmitidos poseen una cantidad de bits invariable siendo que el estándar de video digital utilizado para los propósitos de esta tesis establece un tamaño de paquete de 188 bytes (incluyendo el encabezado), es decir, 1504 bits por paquete, con lo que se obtiene una latencia total de 247.43 ms tomando en cuenta que el retardo por propagación del enlace de subida es de 0.1231 s y el de bajada es de 0.1214 s y partiendo de la Ecuación 4 de la sección 4.2.2.2 para obtener el retardo por transmisión/recepción.

Capítulo 6

Conclusiones y recomendaciones

En el presente capítulo se exponen las conclusiones de la investigación, así como también las aportaciones que se obtuvieron de la misma. Además se proponen algunas recomendaciones a partir del análisis de resultados del Capítulo 5 y de igual manera, se plantea el trabajo futuro que podría darle continuidad a esta tesis.

6.1. Conclusiones

A partir de la elección del tema de investigación, las consultas realizadas en la literatura, la estructuración de la tesis y la realización de pruebas y experimentos para la obtención de resultados, se generaron distintas conclusiones al respecto, las cuales se explican en los siguientes párrafos.

La telemedicina en nuestro país, así como en el resto del mundo, incorpora constantemente tecnología de punta para la salud y el bienestar del ser humano, asimismo, busca la interoperabilidad de los sistemas de comunicación pertenecientes a distintas instituciones u organizaciones públicas y privadas por lo que se ha vuelto una necesidad establecer normas que permitan la operación entre dispositivos electrónicos, máquinas de medición, instrumentos médicos para diagnóstico, medios de comunicación y aparatos orientados al tratamiento de enfermedades.

Utilizando satélites geoestacionarios en los programas de telemedicina a nivel mundial, se alcanza una cobertura total de las zonas con difícil acceso para las comunicaciones alámbricas, siendo así que las comunidades alejadas de las regiones urbanas, ahora incorporan en sus clínicas médicas la infraestructura básica para proporcionar el servicio de envío de información sobre la salud de sus habitantes.

La señal digital en los sistemas de televisión actuales ha sido incorporada para brindar una mayor calidad en los servicios de video, audio y datos alrededor del mundo. De igual manera la compresión de la información que es transmitida al usuario final se realiza utilizando el estándar MPEG-2 del cual ya existen versiones actualizadas con mayores

prestaciones. El estándar A/53 de ATSC, adoptado en nuestro país para transmisión de televisión digital, ya se encuentra en operación teniendo transmisiones en las ciudades de México, Tijuana, Guadalajara, Mexicali, Monterrey, Juárez, Nuevo Laredo, Reynosa y Matamoros teniéndose como fecha límite para completar la transición el 15 de diciembre de 2015. Con el uso del estándar para los sistemas televisivos digitales se presenta la oportunidad de asignar más canales buscando optimizar el uso del espectro radioeléctrico y así liberar capacidad para nuevos servicios de radiocomunicaciones en la banda de 700 MHz.

El video en formato digital, ha tomado gran relevancia en aplicaciones cuyo propósito es el de mejorar la salud humana ya que gracias a la claridad con que se presenta, ahora es posible que los médicos especialistas puedan diagnosticar enfermedades con mayor precisión, sin necesidad de ofrecer sus servicios *in situ* donde se encuentre el paciente. Métodos de compresión de video digital como el utilizado por el estándar H.264/MPEG-4 presentan mejoras notables ante otros como el MPEG-2 y el H.263 en cuanto a desempeño. La Figura 27 muestra las curvas del PSNR (Peak Signal to Noise Ratio) contra la velocidad de datos que presentan distintos codecs integrados a los estándares H.262/MPEG-2 Visual Main Profile, H.263 High Latency Profile (HLP), MPEG-4 Visual Advanced Simple Profile (ASP) y H.264 Main Profile (MP) (Sullivan & Wiegand, 2005).

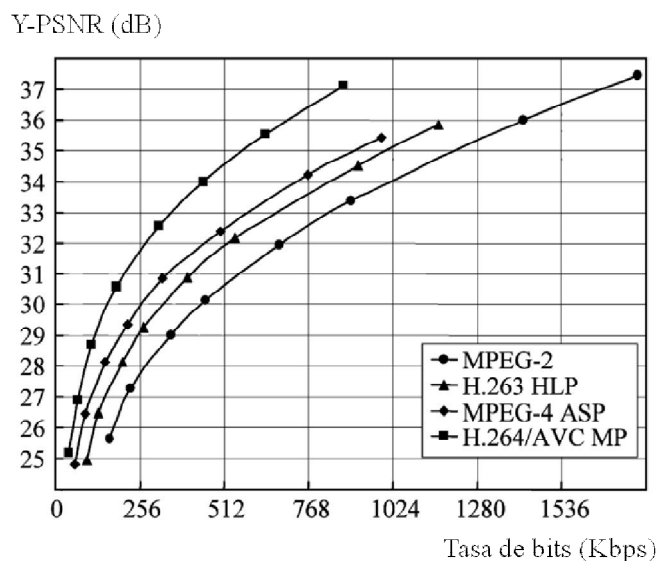


Figura 27. Curvas del PSNR para una secuencia de video de 40 s en aplicaciones de streaming.

De la Figura 27 es posible observar que H.264/MPEG-4 sobresale de los demás estándares al presentar un PSNR que sobrepasa los 30 dB a una tasa de bit de 256 Kbps.

El PSNR es un indicativo de la calidad de los códecs en la reconstrucción de imágenes y videos comprimidos. El desempeño del H.264/MPEG-4 demuestra su importancia en aplicaciones de video digital ya sea para la distribución de multimedia a través de la red, servicio de videoconferencia, streaming de video, etc., lo que representa un gran avance en términos de eficiencia en la codificación, una mejora en robustez contra errores y pérdidas y flexibilidad para un uso óptimo en una gran variedad de tipos de redes.

Los parámetros de calidad de servicio reflejan de los servicios de red, una métrica para calificar el desempeño de la misma, tratando de mejorar constantemente la entrega de multimedia y otros servicios al usuario final. De tal forma que existen una serie de valores permitidos, en cuanto a calidad de servicios, para la confiabilidad de los datos recibidos.

A través de la simulación de un enlace vía satélite con la propiedad de ser una conexión punto a punto unidireccional, fue posible observar que, al modificar el esquema de modulación del sistema así como la tasa de corrección de errores, se presentó lo siguiente:

- Que uno de los parámetros que permiten conocer el rendimiento de un sistema de comunicación, es el tiempo que tarda en transmitir y recibir la información que éste distribuye. La latencia que presentó el sistema que se propuso para este trabajo de investigación, se mantuvo como un valor fijo debido al tamaño de los paquetes transmitidos, ya que este parámetro permaneció constante como lo dicta la base del estándar H.264/MPEG-4 para la paquetización de la información.
- Que la pérdida de bits y los que fueron recibidos exitosamente, permitieron observar el desempeño del sistema en base a las curvas del BER en cada uno de los esquemas de modulación incorporados por lo que a continuación, en la Tabla 13, se presentan los porcentajes de cada uno de ellos.

Tabla 13. Resultados de la Tasa de Paquetes Perdidos (TPP) y Caudal Eficaz (CE) para las modulaciones QPSK, 8PSK y 16QAM aplicadas al sistema.

FEC	QPSK		8PSK		16QAM	
	TPP	CE	TPP	CE	TPP	CE
1/2	0.43%	99.57%	0.6%	99.4%	0.21%	99.78%
2/3	3.19%	96.81%	0.28%	99.71%	0.59%	99.4%
3/4	7.68%	92.32%	0.52%	99.48%	1.01%	98.99%

A partir de la Tabla 13 es posible observar que el sistema provee un mejor desempeño al utilizar 8PSK como esquema de modulación al ofrecer un promedio de 0.46% en la pérdida de información comparado con el 7.68% que ofrece una modulación QPSK en el peor de los casos (para un FEC de 3/4). La ventaja de utilizar una modulación PSK, particularmente en los equipos y sistemas del estándar DVB-S (QPSK), es que la potencia de la fuente es constante lo que simplifica el diseño de amplificadores y etapas receptoras reduciendo costos. Es importante señalar que el promedio en el SNR bajo el cual el sistema presentó un umbral para la construcción de la Tabla fue de 6 dB, valor que reflejó cambios en la tasa de pérdida de paquetes y en el caudal eficaz principalmente en los esquemas QPSK y 16QAM.

En cuanto al retardo total de la información en la parte receptora del enlace, se determinó que por causa de la norma en la que se especifica el tamaño de paquetes en el que son divididos los datos de MPEG, la latencia proporcionada por el sistema en términos globales se adjudica a un valor fijo de 247.43 ms por lo que, de acuerdo a la Recomendación UIT-T G.1010 (Sector de Normalización de las Telecomunicaciones de la UIT, 2000), es un valor que se mantiene por debajo del margen de los 10 s.

Al seguir avanzando en la investigación, se definió que uno de los parámetros de calidad de servicio que afecta a los sistemas de comunicación digital en general, el jitter, no fue establecido como un elemento a medir para los casos de estudio en esta tesis, ya que el enlace proporciona un canal de comunicación satelital unidireccional, en cuyo caso se tomaron en cuenta las Recomendaciones UIT-T G.1010 y UIT-T F.700 para determinar las condiciones en que se hicieron las pruebas y obtener resultados efectivos.

Los casos de estudio analizados con ayuda del sistema de comunicación propuesto permitieron conocer los parámetros de funcionamiento con los que los principales sistemas de TV satelital se desempeñan actualmente.

La normalización de los requerimientos para establecer nuevas medidas en la incorporación de tecnología de punta a los sistemas de comunicación actuales, brinda la oportunidad de generar competitividad y crecimiento en las empresas avocadas a proporcionar servicios tales que mejoren la calidad de vida de la sociedad en general. En estos términos se acuña el concepto de Calidad de Experiencia (QoE) de los usuarios finales de lo cual se habla en el Anexo B.

Las modificaciones que sufren las señales de video sobre el canal de transmisión debido al uso de distintos esquemas de modulación, tasas en la codificación de canal, bandas de frecuencia, tasas de transmisión, la ubicación de las estaciones terrenas tanto receptoras como transmisoras y el equipo de reproducción de video en las clínicas y Hospitales especializados, tienen un impacto directo sobre la percepción de la calidad de la imagen la cual puede ser catalogada dentro de un rango aceptable o inadmisible dependiendo de una serie de factores totalmente aislados al sistema de comunicación, es decir, la opinión del experto en salud. El médico tratante de una enfermedad particularmente caracterizada por la afectación en las capacidades motrices del paciente, fija su atención en darle un tratamiento efectivo tomando en cuenta el grado de movilidad con que realiza actividades rutinarias como caminar, sentarse, alimentarse por cuenta propia, etc. Debido a todo esto, el médico especialista al hacer uso del video digital como herramienta de diagnóstico, forma su opinión en base a la calidad del video que observa, siendo así que a una mayor pérdida de datos en el enlace de comunicación satelital, menor es la nitidez con que se recibe la imagen y por lo tanto no se establece un diagnóstico totalmente fiable. En el caso específico de los escenarios concretados en esta tesis, el sistema que integra una modulación 16QAM a una tasa FEC de 3/4 de mayor efectividad de acuerdo a los resultados en las simulaciones, nos habla de una concreta fiabilidad en la interpretación de los datos en la parte receptora del sistema; al reconstruir los datos hasta reproducir el video que interpretan, se tiene una pérdida de información cuyo impacto en la nitidez del video no es determinante en la opinión del observador, esto se deduce de la cantidad de datos recibidos exitosamente.

La implementación de los parámetros de calidad de servicio en la telemedicina, es una manera de resaltar los beneficios que brinda a los sistemas de salud, sin embargo existen retos importantes que deben tomarse en cuenta para una estandarización en forma.

Se recomienda asegurar la confidencialidad de la información en circulación por las redes de telecomunicaciones ya sea incorporando métodos de encriptación en los datos o incrementando la complejidad en contraseñas. Además, se busca una mayor exactitud en el diagnóstico de padecimientos a partir de imágenes y/o videos transmitidos por la red en relación con las imágenes y/o videos originales para así dar paso a un estándar ubicuo.

Se han obtenido los resultados esperados de acuerdo a los objetivos planteados al principio del trabajo de investigación, conociendo una más de las aplicaciones de la tecnología satelital, en este caso la telemedicina, se realizaron las mediciones pertinentes en un entorno simulado facilitando así la manipulación de los parámetros del sistema de comunicación. Además, se advirtieron las principales características de transmisión de los estándares de televisión digital que tienen cobertura en distintas partes del planeta.

6.2 Aportaciones

Habiendo realizado una investigación en la literatura para así seguir con las pruebas y simulaciones, las principales aportaciones de esta tesis fueron:

- Se obtuvieron valores de calidad de servicio en cuanto a pérdida de paquetes y caudal eficaz en el canal de datos satelital con distintos esquemas de modulación a diferentes tasas de corrección de errores.
- Se comprobó que el uso del estándar H.264/MPEG-4 en aplicaciones médicas funciona como una herramienta efectiva para la obtención de video digital al brindar servicios de salud vía satélite.
- Se promueve la transición del estándar MPEG-2, utilizado en los estándares de televisión digital, a la nueva versión del estándar, el H.264/MPEG-4 al aportar valores de QoS que reflejan la calidad de las imágenes para aplicaciones médicas en el extremo receptor en los enlaces vía satélite.

6.3. Recomendaciones

Las principales recomendaciones para darle continuidad al presente trabajo de investigación son:

- Implementar los escenarios simulados en un sistema de comunicación satelital real involucrando la participación de expertos en salud para validar la resolución del video y su aplicación en rehabilitación física a distancia.
- Resguardar los datos y optimizar el sistema de comunicación para asegurar la confidencialidad de la información transmitida y restringir su distribución utilizando encriptación o protocolos de seguridad.
- Una recomendación para los nuevos sistemas y plataformas de telemedicina, así como para los programas institucionales que se establecen en México, es actualizar los equipos regulando su operación en redes de dispositivos inalámbricos con capacidad para transmitir datos, imágenes, audio, etc. para beneficio propio de los Hospitales así como de sus pacientes

6.4. Trabajo futuro

En cuanto al seguimiento de esta tesis, quedan como trabajo futuro los siguientes puntos:

- Realizar las pruebas en un consultorio médico especializado, tomando un video de muestra en formato digital para su envío a través de una conexión vía satélite utilizando el equipo adecuado para su captura en formato digital.
- Establecer una cama de pruebas con los esquemas de modulación específicos de cada uno de los estándares de TV digital propuestos estableciendo diferentes tasas de corrección de errores en un escenario real con equipo de medición especializado.
- Analizar el comportamiento de los parámetros de QoS bajo los escenarios presentados utilizando el estándar H.265.
- Comparar el desempeño del estándar H.264/MPEG-4 con su sucesor el H.265 y analizar los resultados obtenidos.

- Analizar los parámetros de calidad de servicio utilizando los servicios de internet vía satélite para el envío de multimedios en base al estándar H.264/MPEG-4 aplicados a la telemedicina.

Referencias bibliográficas

Advanced Television Systems Committee Inc. (2009). *ATSC Digital Television Standard: Part 1-Digital Television System*. Washington, D.C.

Aparicio, G., Beltrán, M., Chico, A. L., Gertrudiz, N., Pacheco, A., Prieto, A., Sánchez, K., Silva, M., Silva, L., Torres, H. (2007). *Telemedicina*. Vol. 3, Serie: Tecnologías en salud. Recuperado de: <http://www.cenetec.salud.gob.mx/descargas/TecnologiasSaludV3.pdf>. México, D.F.

Bae, J., Zhang, W., Tomizuka, M. (2012). *Compensation of Packet Loss for a Network-Based Rehabilitation System*. Saint Paul, MN: IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation (ICRA), pp. 2413-2418.

Bianchi, L., Luglio, M., Marciani, M. G., Zampognaro, F. (2010, Noviembre). *Multiservice telemedicine application over an emulated DVB-RCS satellite link*. 2010 3rd International Symposium on Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies (ISABEL), pp. 1-5.

Burr, C., Piñó, A., Quiroz, L., Martín-Lunas, E. (2011). *Guía para el paciente participativo*. México, D. F.: LID Editorial Mexicana.

Centro Nacional de Excelencia Tecnológica en Salud. (2011). *Telemedicina*. Vol. 3. 2ª Edición. Serie: Tecnologías en Salud. Recuperado de: <http://www.cenetec.salud.gob.mx/descargas/telemedicina/publicaciones/Volumen32daEdicion.pdf>. México, D.F.

Chikkerur, S., Sundaram, V., Reisslein, M., & Karam, L. (2011). *Objective Video Quality Assessment Methods: A Classification, Review, and Performance Comparison*. IEEE Transactions on Broadcasting, 57 (2), pp. 165-182.

Darkins, A., & Cary, M. (2000). *Telemedicine and Telehealth: Principles, Policies, Performances and Pitfalls*. Springer.

DTV Status. (2013). *DTV Status*. Recuperado de: www.dtvstatus.net.

European Broadcasting Union. (2005). *Digital Video Broadcasting (DVB): user guidelines for the second generation system for Broadcasting, Intractive Services, News Gathering and other broadband satellite applications (DVB-S2)*. Technical Report, European Telecommunications Standards Institute. Recuperado de: http://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/102300_102399/102376/01.01.01_60/tr_102376v010101p.pdf.

European Broadcasting Union. (2003). *Digital Video Broadcasting (DVB); Interaction channel for satellite distribution systems*. European Standard, European Telecommunications Standards Institute. Recuperado de: http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/301700_301799/301790/01.03.01_60/en_301790v010301p.pdf

European Telecommunications Standards Institute. (1997). *Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for 11/12 GHz satellite services*. Recuperado de: http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/300400_300499/300421/01.01.02_60/en_300421v010102p.pdf. Valbonne.

European Telecommunications Standards Institute. (2013). *Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications (DVB-S2)*. Recuperado de: http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302300_302399/302307/01.03.01_60/en_302307v010301p.pdf.

European Telecommunications Standards Institute. (2009). *Human Factors (HF); Quality of Experience (QoE) requirements for real-time communications services*. Recuperado de: http://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/102600_102699/102643/01.00.02_60/tr_102643v010002p.pdf.

Fiedler, M., Hossfeld, T., Tran-Gia, P. (2010). *A Generic Quantitative Relationship between Quality of Experience and Quality of Service*. IEEE Network , 24 (2), pp. 36-41.

García, R. (2007). *Análisis de parámetros de calidad de servicio en videoconferencia y otras aplicaciones médicas a distancia sobre enlaces satelitales*. Tesis de Maestría en Ciencias en Electrónica y Telecomunicaciones. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California.

Goldman, M. (2010). *What exactly is the difference between MPEG-4 AVC and MPEG-2*. [diapositivas de Power Point]. Recuperado de: https://secure.connect.pbs.org/conferences/technology/2010/presentations/Wed_MPEG-4%20AVC%20vs%20MPEG-2_1630_Goldman.pdf. Ericsson, Solution Area TV, Ericsson, Las Vegas, NV.

Hernández, M. (2009). *Telemedicina, ISSSTE*. [diapositivas de Power Point]. Recuperado de: <http://www.cenetec.salud.gob.mx/descargas/Foro2009MaterialPresentadoPDF/telemedicina/viernes/presentacion5oforo.pdf>. México, D. F.

Hernández, S. (2009). *Telemedicina*. [diapositivas de Power Point]. Recuperado de: <http://salud.edomex.gob.mx/salud/elementos/sesionXXXII/Consejo%20de%20Salud.pdf>. Instituto de Seguridad y Servicios Sociales de los Trabajadores del Estado. México, D. F.

Katoh, H. (2006). *Transmission System for ISDB-S*. Proceedings of the IEEE , 94, pp. 289-295.

Kocian, A., De Sanctis, M., Rossi, T., Ruggieri, M., Del Re, E., Jayousi, S., et al. (2011). *Hybrid Satellite/Terrestrial Telemedicine Services: Network Requirements and Architecture*. 2011 IEEE Aerospace Conference , pp. 1-10.

Langton, C. (2013). *Intuitive Guide to Principles of Communications*. Recuperado el 24 de Septiembre de 2013, de Complex to Real: <http://complextoreal.com/>

Organización Panamericana de la Salud, Oficina Regional de la Organización Mundial de la Salud. (2007). *La Renovación de la Atención Primaria de la Salud en las Américas, Documento de Posición de la Organización Panamericana de la Salud/Organización Mundial de la Salud (OPS/OMS)*. Washington, D.C.

Pierucci, L., & Del Re, E. (2000). *An Interactive Multimedia Satellite Telemedicine Service*. IEEE Multimedia , 7 (2), pp. 76-83.

Sangal, A., Satyamurthy, L. S., Bhatia, B. S., Bhaskarnarayana, A. (2004). *Communication Satellite Based Network for Telemedicine in India*. 6th International Workshop on Enterprise Networking and Computing in Healthcare Industry, 2004. HEALTHCOM 2004. Proceedings. , pp. 149-151.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Coordinación de la Sociedad de la Información y el Conocimiento. (2013). *México Conectado*. Recuperado de: <http://www.mexicoconectado.gob.mx/web/guest/resumen-de-redes-mexico-conectado>

Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Dirección General Adjunta de Espectro, Tecnología y Cobertura Social. (2012). *Libro Blanco, Televisión Digital Terrestre*. Recuperado de: http://www.sct.gob.mx/fileadmin/_migrated/content_uploads/LB_Televisión_Digital_Terrestre_01.pdf. México, D. F.

Secretaría de Salud. Centro Nacional de Excelencia Tecnológica en Salud. (2013). *Estado de la Telesalud 2006-2012*. Recuperado de: http://www.cenetec.salud.gob.mx/interior/programa_telemed.html. México, D. F.

Secretaría de Salud. Hospital Infantil de México Federico Gómez. (2012). *Centro Mexicano de Educación en Salud por Televisión, CEMESTEL*. Recuperado de: <http://www.himfg.edu.mx/interior/cemesa.html>. México, D. F.

Secretaría de Salud. (2013). *Observatorio de los Servicios de Atención Primaria 2012*. Recuperado de: http://www.dged.salud.gob.mx/contenidos/dess/descargas/OSAP_2012.pdf. Secretaría de Salud, Dirección General de Evaluación del Desempeño, México, D. F.

Sector de Normalización de las Telecomunicaciones de la UIT. (2000). *Rec. UIT-T F.700, Recomendación marco para los servicios multimedios*. Recuperado de: <http://www.itu.int/rec/T-REC-F.700-200011-I/es>.

Sector de Normalización de las Telecomunicaciones de la UIT. (2001). *Rec. UIT-T G.1010, Categorías de calidad de servicio para los usuarios de extremo de servicios multimedia*. Recuperado de: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.1010-200111-I/es>.

Sector de Normalización de las Telecomunicaciones de la UIT. (2007). *Rec. UIT-T P.10/G.100 (2006) - Enmienda 1, Vocabulario sobre calidad de funcionamiento y de servicio, Enmienda 1: Nuevo apéndice I - Definición de calidad de experiencia*. Recuperado de: <http://www.itu.int/rec/T-REC-P.10-200701-S!Amd1/en>.

Sector de Radiocomunicaciones de la UIT. (2012). *Rec. UIT-R BO.1516-1, Sistemas de televisión digital multiprograma para la utilización por satélites que funcionan en la gama de frecuencias de 11/12 GHz*. Recuperado de: <http://www.itu.int/rec/R-REC-BO.1516-1-201201-I/es>.

Segen, J. C. (1992). *The Dictionary of Modern Medicine*. New Jersey.

Sullivan, G., & Wiegand, T. (2005). *Video Compression-From Concepts to the H.264/AVC Standard*. Proceedings of the IEEE , 93 (1), pp. 18-31.

Telecommunication Standardization Sector of ITU. (2012). *Advanced video coding for generic audiovisual services*. Recuperado de: <http://www.itu.int/ITU-T/recommendations/rec.aspx?rec=11466>

Telecommunication Standardization Sector of ITU. (2012). *Information technology - Generic coding of moving pictures and associated audio information: Systems*. Recuperado de: <http://www.itu.int/rec/T-REC-H.222.0-201206-I/en>.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Telecomunicaciones de México. (2012). *Memoria Documental, Operación de las Redes e-México*. Recuperado de: http://www.telecomm.net.mx/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=3482&Itemid=220. México, D.F.

Wiegand, T., Sullivan, G., Bjontegaard, G., & Luthra, A. (2003). Overview of the H.264/AVC Video Coding Standard. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for video Technology*, 13 (7), pp. 560-576.

Anexo A

FFmpeg es un software de uso libre el cual contiene bibliotecas de funciones que le permiten codificar, decodificar, multicanalizar, demulticanalizar, reproducir y hacer streaming de audio y video. Dentro de las principales herramientas que ofrece FFMpeg, destacan las siguientes cuatro:

- `ffmpeg`: Es una herramienta que consiste en una línea de comando que convierte archivos multimedia de un formato a otro.
- `ffserver`: Es un servidor de streaming multimedios para transmisiones en vivo.
- `ffplay`: Es un reproductor multimedios basado en SDL (Simple DirectMedia Layer) y en las bibliotecas de funciones de FFMpeg.
- `ffprobe`: Es un analizador de flujo multimedios.

Algunas de las bibliotecas de funciones con las que cuenta FFMpeg y sus funciones se describen a continuación:

- `libavcodec`: Biblioteca de funciones que contiene los codificadores y decodificadores de FFMpeg para audio y video.
- `libavdevice`: Biblioteca de funciones que contiene dispositivos de entrada y salida para trabajar en conjunto con diferentes plataformas de software de multimedios tales Video4Linux, Video4Linux2, Vfw y ALSA.
- `libavformat`: Biblioteca de funciones que contiene multicanalizadores y demulticanalizadores para los archivos en formato de multimedios.
- `libavutil`: Biblioteca de funciones que contiene funciones para simplificar la programación, que incluye generadores de números aleatorios, estructuras de datos, rutinas matemáticas, etc.
- `libswresample`: Biblioteca de funciones que realiza operaciones de remuestreo optimizado de audio, reacomodo de matrices y conversión de formato de muestras.
- `libswscale`: Biblioteca de funciones que realiza conversiones de formato de las escalas de color de pixel en imágenes.

Anexo B

Debido al continuo crecimiento de las redes de telecomunicaciones actuales, tanto cableadas como inalámbricas, y a la incorporación de nuevas tecnologías en la infraestructura de software y hardware de las mismas, se ha vuelto una necesidad y una obligación para las empresas de telecomunicaciones el garantizar un excelente desempeño de las redes así como en la transmisión de datos (QoS) para lograr la satisfacción del usuario final.

En la transmisión de video digital, la percepción del usuario en cuanto a la calidad de los servicios que le ofrecen las compañías es claramente un concepto subjetivo, ya que la opinión sobre funcionalidad y rendimiento varía de persona a persona (QoE), sin embargo, hoy en día existen métricas para la calidad de video que permiten conocer el desempeño de un servicio desde el punto de vista del cliente de una manera objetiva.

En (Chikkerur, Sundaram, Reisslein, & Karam, 2011) se realiza una clasificación, un análisis y una comparación de rendimiento entre diferentes métodos de valoración objetiva de la calidad de video entre los que destacan el MS-SSIM (MultiScale-Structural Similarity), el VQM (Video Quality Metric) y el MOVIE (Motion-based Video Integrity Evaluation) utilizados tanto para video con resolución estándar como para video en alta definición.

El Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones (ETSI por sus siglas en inglés) define la Calidad de Experiencia como la medida del rendimiento, según el usuario, basada en medidas psicológicas objetivas y subjetivas sobre el uso de un producto o servicio propio de las TIC (European Telecommunications Standards Institute, 2009).

La Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) define Calidad de Experiencia (QoE por sus siglas en inglés) como la aceptabilidad general de una aplicación o de un servicio, conforme a la percepción subjetiva del usuario extremo en donde se toman en cuenta los efectos completos del sistema tales como el cliente, la terminal, la red, la infraestructura de servicios, etc. (Sector de Normalización de las Telecomunicaciones de la UIT, 2007).

Además, la UIT cuenta con un comité que se encarga de la creación de recomendaciones referentes a la QoS y QoE denominado ITU-T Study Group 12:

Performance, QoS and QoE, el cual incluye dentro de sus objetivos aspectos como la interoperabilidad y el desarrollo de metodologías de evaluación de calidad, tanto subjetivas como objetivas.

En la Figura A.1 se muestra una relación entre QoE y QoS de manera general, donde el eje “x” se refiere a la degradación de la QoS y el eje “y” describe la QoE en cuanto a una puntuación según la opinión del usuario (Fiedler, Hossfeld, & Tran-Gia, 2010).

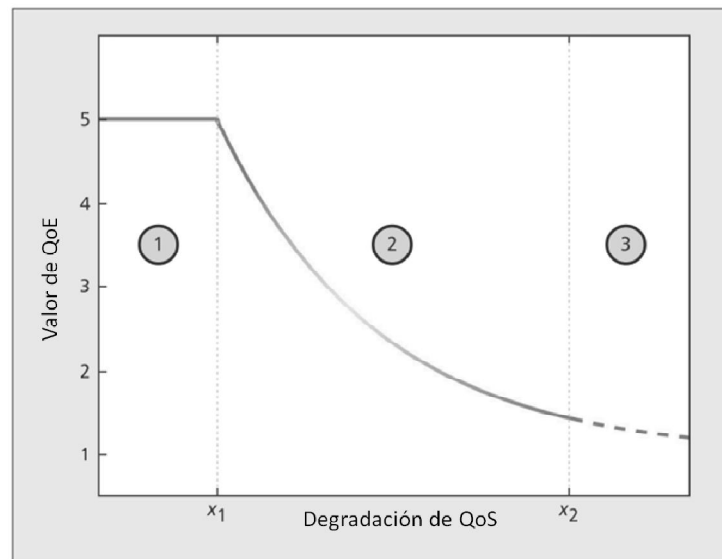


Figura A.1. Curva que denota la relación entre QoE y QoS.

La curva está dividida en tres secciones, separada por dos umbrales, x_1 y x_2 . El Área 1 muestra un valor constante y óptimo de QoE para un valor de QoS que no sufre ninguna perturbación, mientras que en el Área 2, la QoE comienza a decaer después de que las perturbaciones en la QoS exceden el umbral de x_1 , por lo que la satisfacción del usuario sufre las mismas consecuencias. Tan pronto los valores de la QoS alcanzan el umbral x_2 , la calidad de la transmisión se vuelve inaceptable para el usuario, por lo que la abandona o la desecha.

Es así como actualmente se busca una asociación directa y bien definida entre la Calidad de Servicio y la Calidad de Experiencia, siendo que anteriormente estos dos términos se utilizaban indistintamente.

Esta alianza entre dos partes de un mismo conjunto, como lo son la QoS y la QoE dentro del intercambio de contenidos multimedia, toca un punto importante en el desarrollo de las TIC debido a que no sólo se busca la mejora del factor técnico de la infraestructura de red, sino también el aspecto humano en el perfeccionamiento de los servicios en los sistemas de extremo a extremo y así unificar los parámetros que determinan la calidad total de una red de comunicación.

Acrónimos

ACM	Adaptive Coding and Modulation.
ATSC	Advanced Television System Committee.
AWGN	Adaptive White Gaussian Noise.
BER	Bit Error Rate.
BPSK	Binary Phase Shift Keying.
BSS	Broadcasting Satellite Service.
CABAC	Context-Adaptive Binary Arithmetic Coding.
CATV	Cable Television.
CAVLC	Context-Adaptive Variable Length Coding
CDMA	Code Division Multiple Access.
CE	Caudal Eficaz.
CEMESTEL	Centro Mexicano de Educación en Salud por Televisión
CPM	Continuous Phase Modulation.
dB	Decibels
DBS	Direct Broadcast Satellite.
DCT	Discrete Cosine Transform.
DSL	Digital Subscriber Line.
DTH	Direct-to-Home.
DTTB	Digital Terrestrial Television Broadcasting.
DTV	Digital Television.
DVB-RCS	Digital Video Broadcasting - Return Channel Satellite.
DVB-S/S2	Digital Video Broadcasting by Satellite/Second Generation.
EDUSAT	Red Satelital de Televisión Educativa (Educación, satélite).
EE.UU.	Estados Unidos de América.
FDMA	Frequency Division Multiple Access.
FEC	Forward Error Correction.
FSS	Fixed Service Satellite.
HDTV	High Definition Television.
HRD	Hypothetical Reference Decoder.

IEC	International Electrotechnical Commission.
IMSS	Instituto Mexicano del Seguro Social
IP TV	Internet Protocol Television.
ISDB	Integrated Services Digital Broadcasting.
ISI	Inter-Symbol Interference.
ISM	Interactive Storage Media.
ISO	International Organization for Standardization.
ISSSTE	Instituto de Seguridad y Servicios Sociales de los Trabajadores del Estado
ITU-R	International Telecommunication Union, Radiocommunication Sector.
ITU-T	ITU, Telecommunication Standardization Sector.
JVT	Joint Video Team.
Kbps	Kilo Bits por Segundo.
MBAFF	Macroblock-Adaptive Frame/Field.
Mbps	Mega Bits por Segundo.
MF TDMA	Multi-Frequency Time Division Multiple Access.
MHz	Mega Hertz.
MMM	Multimedia Mailing.
MPEG	Moving Picture Experts Group.
MSPN	Multimedia Services over Packet Networks.
NAL	Network Abstraction Layer (Capa de Abstracción de Red).
NTSC	National Television System Committee.
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing.
PAFF	Picture-Adaptive Frame/Field.
PCCC	Parallel Concatenated Convolutional Code.
PIRE	Potencia Isotrópica Radiada Equivalente.
PLR	Packet Loss Rate.
PSNR	Peak Signal to Noise Ratio.
QAM	Quadrature Amplitude Modulation.
QoE	Quality of Experience (Calidad de Experiencia).
QoS	Quality of Service (Calidad de Servicio).
QPSK	Quaternary Phase Shift Keying.

RF	Radio Frequency.
RoF	Radio over Fiber.
RTC	Real-Time Conversational.
RVS	Remote Video Surveillance.
SCCC	Serial Concatenated Convolutional Code.
SCPC	Single Channel Per Carrier.
SCT	Secretaría de Comunicaciones y Transportes.
SDTV	Standard Digital Television.
SMATV	Satellite Master Antenna Television.
SNC	Sistema Nervioso Central.
SNR	Signal to Noise Ratio.
SSM	Serial Storage Media.
TCM	Trellis-Coded Modulation.
TDM	Time Division Multiplexing.
TIC	Tecnologías de la Información y Telecomunicaciones.
TPP	Tasa de Paquetes Perdidos.
VCEG	Video Coding Experts Group.
VCL	Video Coding Layer (Capa de Codificación de Video).
VCM	Variable Coding and Modulation.
VSAT	Very Small Aperture Terminal