

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE INGENIERIA – MEXICALI**

DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



**ANÁLISIS DE ESTRATEGIAS PARA AHORRO DE POTENCIA DE
TRANSMISIÓN EN LOS ESTÁNDARES DE VIDEO MÓVIL FLO Y MBMS**

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
DOCTOR EN INGENIERÍA presenta:

RAÚL TAMAYO FERNÁNDEZ

Directores de Tesis:

Dr. Ángel Gabriel Andrade Reátiga

Dr. Arturo Serrano Santoyo

Mexicali, Baja California. Enero de 2013

Dedicatoria

A mi esposa Elisa, por todo su apoyo, su cariño, su ejemplo, y todo lo que me ha dado y que se resume en una palabra: Amor. TACTMCCTMFYCTMA.

A mis hijos Daniel, Leonardito[‡] y Ernesto, porque son mi alegría y mi motivo para seguir superándome.

Agradecimientos

A Dios por permitirme terminar este proceso de mi vida.

A mis familias, Los Tamayo y Los Morán, por sus ejemplos de lucha que me motivan a seguir adelante.

A mis directores de tesis, Ángel y Arturo, por su apoyo para la realización de este trabajo y sobretodo por su amistad.

A Roberto Conte, porque siempre me estuviste animando para concluir esta tesis y has sido un buen amigo para otros temas de la vida.

Al Dr. David Rosas, por sus recomendaciones y consejos para enfocar este trabajo.

A mi compadre Raúl Rivera, por su apoyo y darme ánimos para dedicarle tiempo a la conclusión de la tesis. A los demás jefes que también me lo permitieron, Ricardo Zambrano e Ismael Gutierrez.

A la UABC, por permitirme realizar otra meta más (¡ahora soy doble cimarrón!)

Al CICESE, por su apoyo para realizar este trabajo.

CONTENIDO

Capítulo 1

Introducción	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Planteamiento del problema.....	2
1.3 Hipótesis	4
1.4 Objetivos de la tesis	4
1.5 Metas.....	5
1.6 Metodología.....	5
1.7 Organización de la tesis	6

Capítulo 2

Servicio Multimedia por Broadcast o Multicast (MBMS).....	7
2.1 Introducción.....	7
2.2 Interfaz aérea en enlace de bajada LTE	9
2.2.1 Cálculo de CRC	9
2.2.2 Codificación de canal.....	10
2.2.3 Entrelazado e igualación de tasa de bits	11
2.2.4 Mezclado de bits	11
2.2.5 Modulación	12
2.2.6 Precodificación	12
2.2.7 Mapeo a elementos de los recursos.....	12

2.2.8 Generación de la señal OFDM en banda base	13
2.3 Punto de conmutación de modo de transmisión	13
2.4 Multimedia Broadcast over Single Frequency Networks (MBSFN).....	15

Capítulo 3

Estándar FLO (Forward Link Only).....	17
3.1 Introducción.....	17
3.2 Interfaz aérea de FLO	19
3.3 Generación del canal de datos (MLC)	21
3.3.1 Codificador Reed-Solomon	22
3.3.2 CRC (Cyclic Redundancy Check, Código de Redundancia Cíclica)	22
3.3.3 Turbo código.....	23
3.3.4 Entrelazado de bits (Bit interleaving)	24
3.3.5 Relleno de los buffers de ranura	25
3.3.6 Modulación en subportadoras	26
3.3.7 Proyección de ranura al entrelazado	26
3.3.8 Proyección de entrelazado en subportadoras	26
3.3.9 Modos de operación de FLO	27

Capítulo 4

Canal radio	29
4.1 Introducción.....	29
4.2 Modelo de Hata para pérdidas por propagación	29

4.3 Modelo de Zheng y Xiao para desvanecimiento de la señal.....	31
4.4 Modelo de canal COST 207 para multitrayectorias.....	31
4.5 Redes de Frecuencia Única (SFN).....	34

Capítulo 5

Arquitectura de simulación	37
5.1 Diseño de la arquitectura de simulación.....	37
5.2 Implementación de la arquitectura de simulación en Matlab	39

Capítulo 6

Resultados: MBMS y MBSFN	41
6.1 Simulación para obtención de valores de referencia iniciales	41
6.2 Simulación de red MBMS en diferentes ambientes de propagación	45
6.3 Simulación de red MBSFN en diferentes ambientes de propagación	49

Capítulo 7

Resultados: estándar FLO	53
7.1 Evaluación para un transmisor.....	53
7.2 Evaluación de una red SFN de dos transmisores.....	57
7.3 Evaluación de una red SFN con tres transmisores.....	60
7.4 Quinto escenario: simulación de caso de uso	65

Capítulo 8

Conclusiones	71
---------------------------	-----------

8.1 Resumen	71
8.2 Conclusiones.....	72
8.3 Aportaciones	73
8.4 Trabajo futuro	73
Bibliografía	74

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Arquitectura MBSFN	8
Figura 2. Generación de canal de datos	9
Figura 3. Cálculo de CRC.....	10
Figura 4. Turbo codificador.....	10
Figura 5. Codificador convolucional “tail biting”	11
Figura 6. Entrelazado e igualación de tasa de bit.	11
Figura 7. Constelaciones de modulación en FLO: QPSK y 16-QAM.....	12
Figura 8. Area MBSFN.....	15
Figura 9. Arquitectura de FLO	17
Figura 10. Estructura en el tiempo de un símbolo OFDM.....	20
Figura 11. Generación de canal de datos multimedia de usuario.	21
Figura 12. Ilustración de la codificación Reed-Solomon.	22
Figura 13. Aplicación del CRC y bits de cola.	23
Figura 14. Turbo Codificador (TIA, 2006).....	24
Figura 15. Proceso de entrelazado de bits.....	25
Figura 17. Proyección de ranuras a entrelazado.	27
Figura 18. Estructura del entrelazado en las portadoras activas.....	27
Figura 18. Casos de interés en una red SFN de tres transmisores.	36
Figura 20. Arquitectura de simulación.	38
Figura 21. Bloques del modelo de simulación en Matlab 2008a.....	40

Figura 22. Topología para obtención de valores de referencia iniciales.	41
Figura 23. Potencia de estación base vs número de usuarios.	43
Figura 24. Resultados de [Alexiou, 2007].	44
Figura 25. Potencia vs Número de usuarios en ambiente rural.	45
Figura 26. Potencia vs Número de usuarios en ambiente urbano.	46
Figura 27. Potencia vs Número de usuarios en ambiente urbano denso.	46
Figura 28. Punto de conmutación para diferentes ambientes de propagación.	48
Figura 29. Casos de estudio para una MBSFN.	49
Figura 30. Punto de conmutación de MBSFN en ambiente rural.	50
Figura 31. Punto de conmutación de MBSFN en ambiente urbano.	51
Figura 32. Punto de conmutación de MBSFN en ambiente urbano denso.	51
Figura 33. Localización del punto de medición para un solo transmisor	53
Figura 34. Máximo alcance de un transmisor en ambiente rural.	55
Figura 35 Máximo alcance de un transmisor en ambiente urbano.	55
Figura 36 Máximo alcance de un transmisor en ambiente urbano denso.	56
Figura 36. Puntos de operación importantes en una red SFN de dos transmisores.	57
Figura 38. Máxima distancia entre dos transmisores $T_a < T_b$ en ambiente rural.	59
Figura 39. Máxima distancia entre dos transmisores $T_a < T_b$ en ambiente urbano.	59
Figura 40. Máxima distancia entre dos transmisores $T_a < T_b$ en ambiente urbano denso.	60
Figura 40. Puntos de operación importantes en una red SFN de tres transmisores.	61
Figura 42. Máxima distancia entre tres transmisores $T_a < T_b < T_c$ en ambiente rural.	63
Figura 43. Máxima distancia entre tres transmisores $T_a < T_b < T_c$ en ambiente urbano.	63

Figura 44. Máxima distancia entre tres transmisores $T_a < T_b < T_c$ en ambiente urbano denso.	64
Figura 45. Análisis de cobertura de FLO en modo 0 para dos transmisores en diferente ambiente.....	67
Figura 46. Análisis de cobertura de FLO en modo 1 para dos transmisores en diferente ambiente.....	67
Figura 47. Análisis de cobertura de FLO en modo 2 para dos transmisores en diferente ambiente.....	68
Figura 48. Análisis de cobertura de FLO en modo 3 para dos transmisores en diferente ambiente.....	68
Figura 49. Análisis de cobertura de FLO en modo 4 para dos transmisores en diferente ambiente.....	69

LISTA DE TABLAS

Tabla I. Número de símbolos OFDM por segundo y distancia entre portadoras para diferentes ancho de banda del canal de RF.....	21
Tabla II. Modos de operación de la capa física de FLO.....	28
Tabla III. Especificaciones de canal COST 207 para áreas rurales.....	33
Tabla IV. Especificaciones de canal COST 207 para áreas urbanas.....	33
Tabla V. Especificaciones de canal COST 207 para áreas urbanas densamente construidas.	34
Tabla VI. Parámetros de operación de red MBMS.....	42
Tabla VII. Puntos de conmutación para diferentes ambientes de propagación.....	47
Tabla VIII. Puntos de conmutación y ahorro de potencia de MBSFN en diferentes ambientes de propagación.....	52
Tabla IX. Parámetros de simulación de un solo transmisor	54
Tabla X. Parámetros de operación de la SFN de dos transmisores.....	58
Tabla XI. Parámetros de operación de la SFN de tres transmisores.....	62
Tabla XII. Parámetros de operación de la SFN de dos transmisores en el valle de Mexicali.	66
Tabla XIII. Porcentaje de cobertura de los modos evaluados respecto al modo 0.....	70

Capítulo 1

Introducción

1.1 Antecedentes

Las tecnologías inalámbricas emergentes, junto con las tecnologías de las redes IP, están cambiando la forma como la gente se comunica y como realizan sus actividades, ya que permiten el desarrollo de nuevos servicios y aplicaciones para comunicaciones móviles.

En los últimos años, las mejoras de la tecnología contribuyeron a que el video por Internet se convirtiera en un fenómeno emergente [Kaul, 2006] [Dans, 2007]. Por un lado, se desarrollaron mejores algoritmos de codificación y compresión de contenidos audiovisuales, aunado a que cada vez más gente cuenta con mejor acceso a Internet (más ancho de banda); además de la participación de los usuarios con contenido generado por ellos mismos. Por otra parte, las redes inalámbricas contribuyen al cambio en la forma en que la gente se comunica, trabaja y entretiene, ya que debido a los avances en la tecnología, éstas ofrecen comunicación en cualquier instante, en cualquier parte, con cualquier persona, a un costo razonable [3G Americas, 2005].

El servicio de video móvil es la capacidad de recibir contenido audiovisual (por ejemplo: videos musicales, noticieros y películas) en un dispositivo portátil a través de redes celulares. Es un servicio emergente dentro de las comunicaciones inalámbricas que está generando un abanico de nuevos servicios para los consumidores (como series de televisión, eventos deportivos, entre otros), lo cual proporciona nuevas vías de negocio en todos los sectores de la industria audiovisual y de telecomunicaciones. [eMarketer, 2010] predice que las ganancias por el servicio de video móvil en los Estados Unidos se triplicarán entre 2009 y 2014, de \$436 millones de dólares a \$1.34 billones de dólares. Además, estos servicios son importantes para la población ya que permiten el acceso universal a contenidos multimedia educativos en cualquier momento y lugar [Gómez Barquero et al, 2007].

La oferta de aplicaciones de video y otros servicios multimedia en teléfonos celulares inteligentes (smartphones) se realiza principalmente a través de las redes celulares 3G y 4G existentes. Hasta hace poco tiempo, la transmisión de datos en las redes inalámbricas de este tipo de aplicaciones se realizaba solamente vía unicast, es decir, a cada usuario se le asignan recursos de radio en forma exclusiva durante la sesión. Lo anterior presenta inconvenientes, tales como: agotamiento rápido del ancho de banda del proveedor inalámbrico, video de baja calidad (afectada por la cantidad de usuarios y el tráfico en la red celular), y costos altos del servicio. El costo elevado del espectro de frecuencias y la ineficiente transmisión de video móvil en modo unicast impiden el crecimiento de este servicio hacia un mercado de masas. De ahí la necesidad de cambiar de paradigma hacia un modo de transmisión en multicast o broadcast, en el que una misma señal pueda recibirse por varios usuarios simultáneamente, de tal forma que los recursos de radio se puedan compartir [Laine, 2006].

1.2 Planteamiento del problema

En la actualidad la difusión de video a dispositivos móviles se realiza a través de las redes de comunicaciones móviles de banda ancha existentes. En este esquema a cada usuario se le asigna un ancho de banda dedicado cuando accede al contenido, por lo que el proveedor inalámbrico se enfrenta al problema de escasez de espectro cuando una gran cantidad de usuarios tratan de acceder al mismo contenido. Dado que el ancho de banda es escaso y caro, para lograr un retorno de inversión rápido, el proveedor del servicio sólo otorga el servicio a aquellos clientes que pueden pagar un costo adicional por el mismo, lo cual limita su crecimiento en número de usuarios e imposibilita a éstos de contar con un servicio a costo suficientemente bajo para lograr un mercado de masas. Hay algunas propuestas que proponen ofrecer el servicio gratuito con base en programación con comerciales, pero aún no están implementadas.

Una solución emergente que permitiría eficientar el uso del ancho de banda para la transmisión de un mismo contenido a varios dispositivos móviles simultáneamente, es utilizar el modo de transmisión broadcast/multicast. Existen dos formas de realizar una transmisión broadcast/multicast: por un lado, utilizar las redes 3G y 4G existentes actualizadas con esta nueva funcionalidad de transmisión multicast, y por otro lado crear

redes paralelas. Para el primer caso se desarrolló el estándar MBMS (Multimedia Broadcast/Multicast System), de la alianza 3GPP; mientras que para el segundo enfoque se crearon los estándares DVB-H (Digital Video Broadcasting for Handhelds), y FLO (Forward Link Only), entre otros.

Para asegurar que la experiencia de usuario sea uniforme sobre toda el área de cobertura y la utilización de los recursos espectrales sea eficiente, los sistemas broadcast/multicast utilizan el concepto de operación sobre redes de frecuencia única (SFN, Single Frequency Network) [Chari et al, 2007]. En una red SFN todos los transmisores se sincronizan para transmitir la misma señal a la misma frecuencia, de modo que todos los receptores reciben la misma señal desde varios transmisores.

En el caso de las redes 3G y 4G existentes, el estándar MBMS permite que la transmisión de contenido multimedia cambie de modo unicast a modo multicast/broadcast a partir de lo que se denomina el “punto de conmutación”. El punto de conmutación determina el momento oportuno de cambiar de un modo de transmisión a otro para obtener un ahorro tanto en ancho de banda como en potencia de transmisión, lo cual significa disminución de costos y de interferencia. El estándar MBMS no establece cuál es el valor del punto de conmutación, por lo que diferentes análisis que se encuentran en la literatura establecen valores que van desde cinco hasta nueve usuarios [Soares et al, 2006], [Alexiou, 2007]. La versión 6 de MBMS hace referencia a su utilización en redes de frecuencia única [3GPP TS 23.246, 2004], lo que se denomina MBSFN (Multimedia Broadcast over Single Frequency Networks). Para esta implementación, en la literatura se pueden encontrar trabajos en donde se analiza su cobertura [Rong et al, 2008], eficiencia espectral [Alexiou, 2012] o posibles mejoras, como el uso de códigos Golden [Konrad et al, 2009], a diferencia de este trabajo de investigación en el que se determina el valor del punto de conmutación para este nuevo esquema de operación.

Con respecto al uso de redes paralelas dedicadas para transmisión de video móvil, el modo de transmisión siempre es multicast/broadcast, por lo que no existe un punto de conmutación. Para el despliegue de estas redes se debe contar con un diseño de red que permita tener cobertura total con la calidad de servicio requerida a una potencia de transmisión adecuada. En la literatura es posible encontrar análisis de desempeño de estas redes en ambientes urbanos, sin embargo, dado que la eficiencia de cualquier sistema de

comunicaciones inalámbricas depende del entorno en el que se esté operando [Stüber, 2001], es deseable contar con referencias del desempeño de las redes de interés para este trabajo en otros tipos de ambientes, tales como los rurales y los urbanos densos, que tienen condiciones de propagación muy diferentes, ya que este tipo de redes se tienden a implantar primero en áreas muy pobladas (por lo general con ambiente urbano denso), y algunas otras zonas se encuentran rodeadas de un ambiente rural.

Por todo lo anterior, se requiere realizar un análisis cuantitativo de los estándares de transmisión de video móvil en modo multicast/broadcast, específicamente en redes de frecuencia única, de manera que se cuente con referencias que apoyen para hacer un mejor uso del espectro de frecuencias (lo cual permitiría ofrecer más servicios con ese ancho de banda ahorrado) y adecuar la potencia de transmisión en este tipo de redes de acuerdo al tipo de ambiente de propagación en el que se implanten.

1.3 Hipótesis

Durante el desarrollo de esta investigación sobre el servicio de video móvil se plantean dos hipótesis:

1. Existe un punto de conmutación de modo de transmisión (unicast a multicast/broadcast, o viceversa) en redes celulares 3G/4G que utilizan el estándar MBMS, tal que permite ahorrar ancho de banda y potencia de transmisión.
2. Dada una potencia de transmisión, el ambiente de propagación inalámbrico influye significativamente en el área de cobertura de una red SFN para una calidad mínima requerida por el servicio de video móvil.

1.4 Objetivos de la tesis

Proponer estrategias de ahorro de ancho de banda y potencia de transmisión en redes para transmisión de video móvil, que tomen en cuenta el tipo de ambiente de propagación inalámbrico en que se despliegan.

1.5 Metas

Las metas de este trabajo son:

- Determinar los puntos de conmutación de modo de transmisión (unicast a multicast/broadcast) para ahorro de ancho de banda y potencia de transmisión, en una red MBMS habilitada para transmisión de video móvil, en diferentes ambientes de propagación.
- Determinar el área de cobertura de una red de frecuencia única FLO para transmisión de video móvil, en diferentes ambientes de propagación.

1.6 Metodología

La metodología seguida para el desarrollo de la tesis consistió en el análisis y comprensión de las características, especificaciones y requerimientos de los estándares de video móvil MBMS y FLO para profundizar en su entendimiento y lograr una adecuada representación al momento de realizar su modelado. También se analizaron y seleccionaron técnicas de modelado del canal inalámbrico ya que es un elemento muy importante que influye directamente en los resultados del trabajo.

Posteriormente se hizo la implementación en una herramienta computacional de las características y especificaciones de los estándares de video móvil y del canal inalámbrico, y se propusieron diferentes escenarios que permitieron obtener las métricas importantes para esta investigación, como el punto de conmutación en las redes MBMS y el área de cobertura en las redes FLO.

Analizar los resultados obtenidos para demostrar que es posible obtener un ahorro de ancho de banda y potencia de transmisión en las redes para transmisión de video móvil estudiadas, tomando en cuenta el tipo de ambiente de propagación inalámbrico en que se implementen.

1.7 Organización de la tesis

El presente documento se estructuró de la siguiente manera:

El capítulo 2 presenta el estándar MBMS para habilitar las redes 3G/4G para transmisión de video en multicast/broadcast, mientras que el estándar FLO se describe en el capítulo 3. En el capítulo 4 se explica la caracterización del canal radio considerando pérdidas por propagación, multitrayectorias y desvanecimientos, y se describen las características clave de las redes de frecuencia única. Estos tres capítulos conforman el marco teórico del trabajo de tesis.

En el capítulo 5 se hace la descripción de la arquitectura de simulación construida para este trabajo. En el capítulo 6 se presentan y analizan los resultados del punto de conmutación de unicast a multicast/broadcast en redes MBMS, mientras que en el capítulo 7 se presentan y analizan los resultados del área de cobertura del estándar FLO y se presenta un caso de uso.

Finalmente, en el capítulo 8 se hace un resumen del trabajo realizado, se dan las conclusiones y aportaciones del mismo y se enlistan líneas de trabajo futuro.

Capítulo 2

Servicio Multimedia por Broadcast o Multicast (MBMS)

2.1 Introducción

Las compañías telefónicas celulares requieren de nuevas tecnologías que optimicen el uso de su espectro de frecuencia asignado y así lograr un mayor índice de penetración de los servicios de video móvil. Para ello, la solución técnica sobre redes 3G/4G se dio en la especificación Release 6 de 3GPP, llamada MBMS (Multimedia Broadcast Multicast Service, Servicio Multimedia por Broadcast o Multicast).

El servicio MBMS se basa en la transmisión de contenido multimedia punto-multipunto y consiste en la agrupación de dos tipos de servicios:

- Un servicio de difusión (broadcast) que puede recibirse por todos los usuarios ubicados en el área de cobertura del transmisor.
- Un servicio multicast, que se recibe únicamente por los usuarios suscritos al grupo multicast correspondiente.

Aunque el servicio MBMS puede utilizarse de forma independiente en cada celda de la red, comúnmente se piensa en este servicio para utilizarse en un contexto de transmisión en red SFN, donde un grupo de celdas utilizan la misma frecuencia y están sincronizadas en tiempo. Lo anterior permite que la terminal móvil trate a las múltiples señales recibidas de los diferentes transmisores como si fueran ecos de una misma señal, de modo que en lugar de comportarse como interferencia se pueden combinar apropiadamente aumentando el nivel de la señal recibida. A este tipo de transmisión se le conoce como MBSFN (Multicast/Broadcast over Single Frequency Networks). La Figura 1 muestra la arquitectura de esta red, donde pueden apreciarse:

- Broadcast Multicast Service Center (BM-SC): es el punto de acceso a los proveedores de contenidos. Realiza funciones de autorización a los terminales móviles para acceder al servicio MBMS.

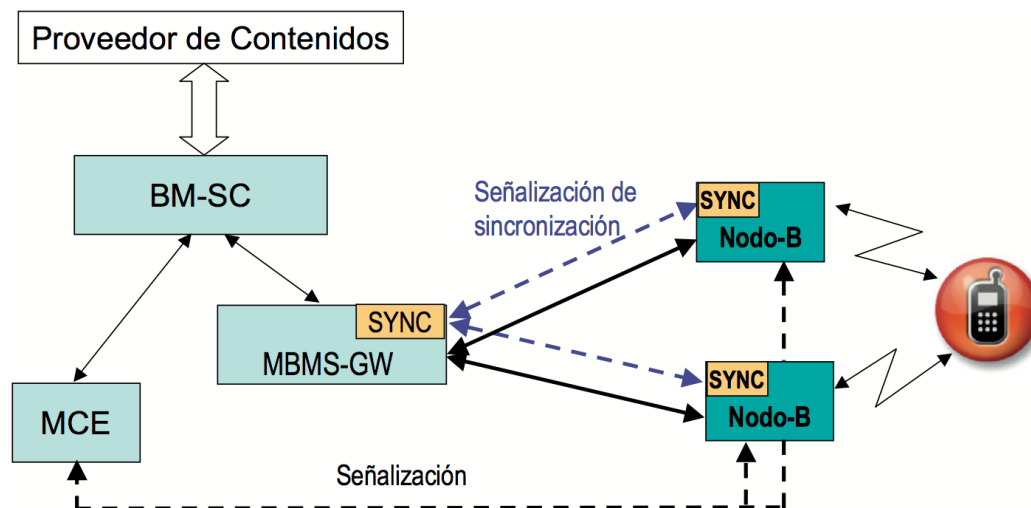


Figura 1. Arquitectura MBSFN

- MBMS Gateway (MBMS-GW): se encarga de distribuir el contenido a todos los Nodo-B (estaciones base) de una determinada área de servicio, así como de gestionar la sesión MBMS. También se encarga de funciones relacionadas con la tarificación del servicio.
- Multi-cell/multicast Coordination Entity (MCE): es la entidad lógica encargada de gestionar en frecuencia y tiempo los recursos asignados en el caso de transmisiones MBMS multicelda.
- Nodo-B: ejecuta los protocolos de la interfaz radio, tanto del plano de usuario como del plano de control, y lleva a cabo toda la gestión de la interfaz radio.

La interfaz de radio entre el Nodo-B y el equipo terminal (UE, User Equipment) se basa en el estándar LTE (Long Term Evolution), el cual utiliza Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales (OFDM) en el enlace de bajada (Nodo-B a UE), con diferentes anchos de banda (1.4, 3, 5, 10, 15 y 20 MHz), además de la modulación QPSK ó 16-QAM, y codificación de error con códigos convolucionales y Reed-Solomon. En la subsección 2.2 se dan más detalles de la interfaz de aire del enlace de bajada de LTE por ser el de interés para esta investigación.

2.2 Interfaz aérea en enlace de bajada LTE

Antes de que los bits sean transportados en una señal de radiofrecuencia LTE, pasan por varios procesos que los hacen resistentes a la atenuación y los empaqueta en una forma adecuada para su transmisión por el aire. El procesamiento inicia desde que se reciben los datos de la capa MAC (Medium Access Control) y termina hasta que son transmitidos por una antena, de acuerdo al diagrama de la Figura 2, cuyos bloques se explican a continuación [3GPP TS 36.211, 2008].

2.2.1 Cálculo de CRC

Se realiza con el objetivo de detectar errores en los bits; si el CRC falla, los bits deben retransmitirse. Se agrega el CRC a un Bloque de Transporte (TP, Transport Block) de acuerdo al siguiente generador polinomial:

$$g_A(D) = D^{24} + D^{23} + D^{18} + D^{17} + D^{14} + D^{11} + D^{10} + D^7 + D^6 + D^5 + D^4 + D^3 + D + 1 \quad (1)$$

Posteriormente, si el TP es demasiado grande, se divide en Bloques de código (CB, Code Block) de hasta 6120 bits, a los cuales se les agrega el CRC que se obtiene con el polinomio:

$$G_B(D) = D^{24} + D^{23} + D^6 + D^5 + D + 1 \quad (2)$$

La Figura 3 ilustra el proceso de cálculo de CRC.

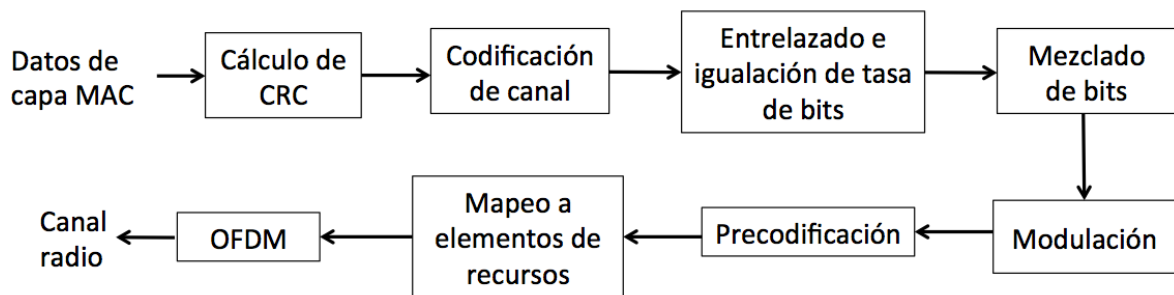


Figura 2. Generación de canal de datos

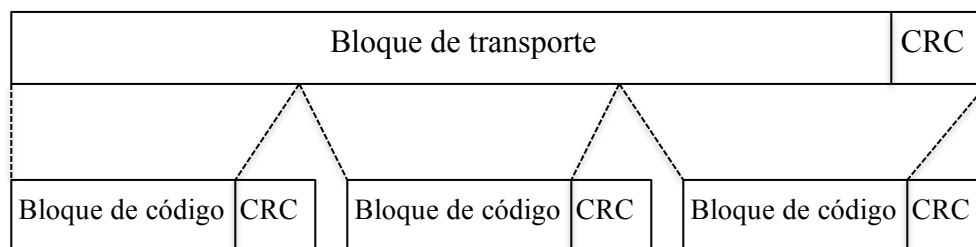


Figura 3. Cálculo de CRC.

2.2.2 Codificación de canal

La codificación de canal se hace a través de un turbo codificador, donde una secuencia de la información se codifica por un codificador convolucional y una versión entrelazada por otro codificador convolucional, como se muestra en la Figura 4. La tasa de codificación resultante es $1/3$.

En el caso de los canales de broadcast (BCH, Broadcast Channel), se utiliza un codificador convolucional llamado “tail biting”, con tasa de $1/3$, como el mostrado en la Figura 5.

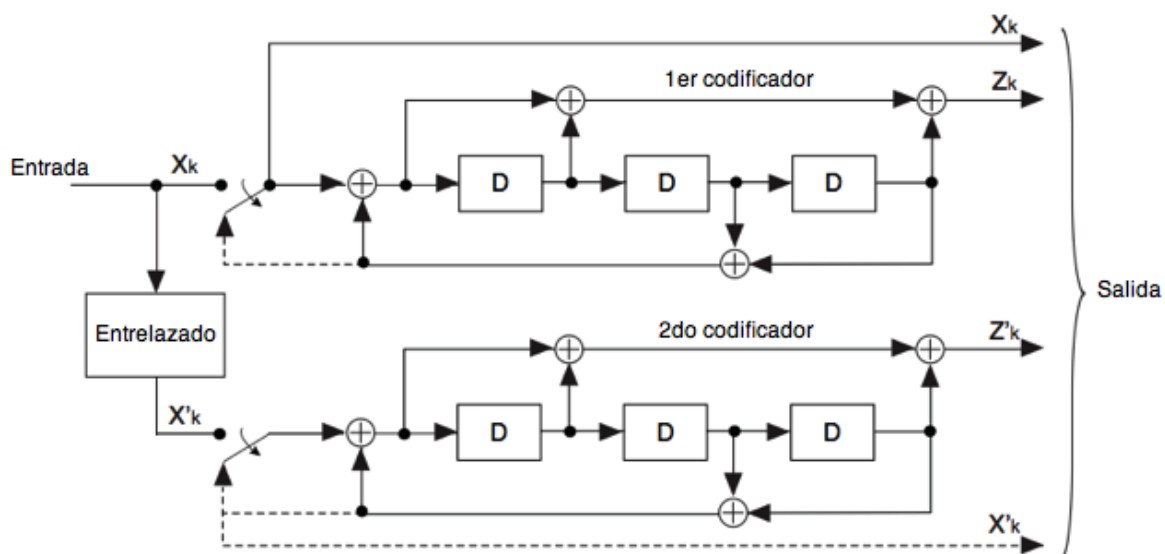


Figura 4. Turbo codificador.

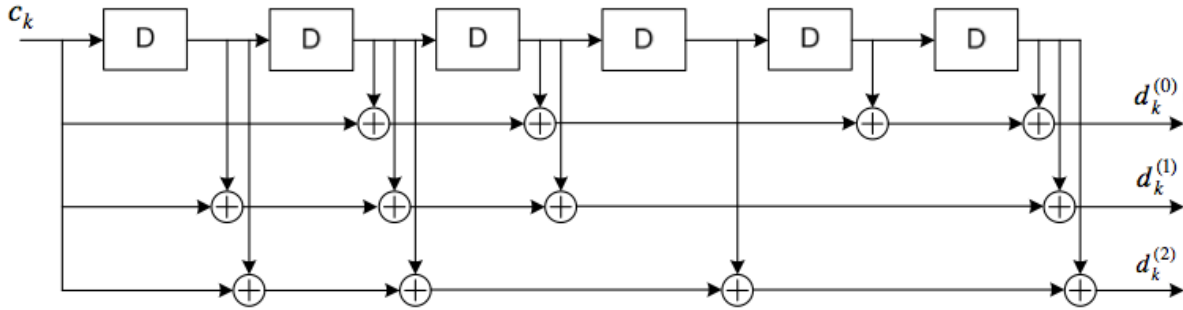


Figura 5. Codificador convolucional “tail biting”.

2.2.3 Entrelazado e igualación de tasa de bits

Los tres flujos de bits codificados $d_k^{(0)}$, $d_k^{(1)}$ y $d_k^{(2)}$ son sujetos a un proceso de entrelazado y si es necesario se hace una remoción de bits para igualar su tasa a la del canal de transporte, como se muestra en la Figura 6.

2.2.4 Mezclado de bits

Para mezclar los bits se utiliza una secuencia “gold” de longitud 31, que genera 231 secuencias pseudo-aleatorias a usar para las palabras código de entrada. Si la palabra código de entrada es $b^{(q)}(0) b^{(q)}(1) b^{(q)}(2) \dots$ y el código de mezclado es $c^{(q)}(0) c^{(q)}(1) c^{(q)}(2) \dots$, el bloque de bits resultante es $b'^{(q)}(0) b'^{(q)}(1) b'^{(q)}(2) \dots$, de acuerdo a:

$$b'^{(q)}(i) = (b^{(q)}(i) + c^{(q)}(i)) \bmod 2 \quad (3)$$

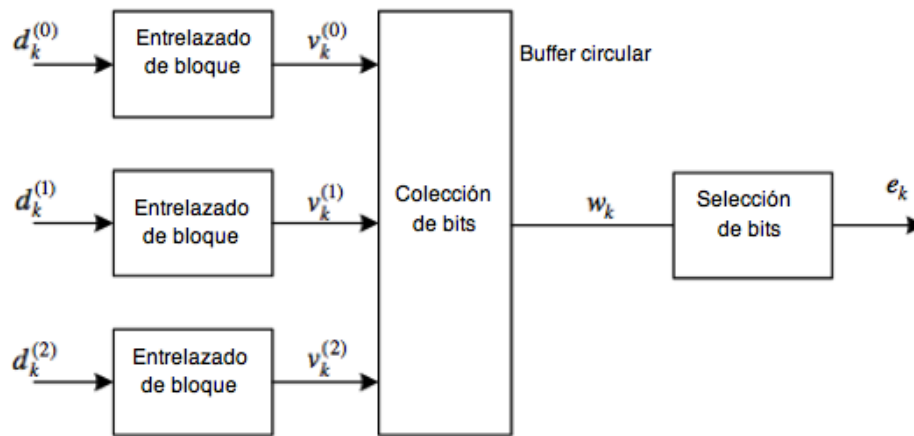


Figura 6. Entrelazado e igualación de tasa de bit.

2.2.5 Modulación

La modulación convierte los bits de las palabras código en símbolos complejos. Un símbolo puede representar n bits, dependiendo del tipo de modulación ($n=2$ para QPSK, $n=4$ para 16QAM, $n=6$ para 64QAM). En la Figura 7 se presentan las constelaciones para QPSK y 16 QAM.

2.2.6 Precodificación

La precodificación se realiza para adaptar la señal a las condiciones del canal. La transmisión es precodificada de acuerdo a la respuesta en frecuencia del canal, obtenida por la retroalimentación que el equipo receptor envía a la estación transmisora. En base a esa retroalimentación se aplica una de tres posibles matrices de precodificación.

2.2.7 Mapeo a elementos de los recursos

Los símbolos complejos se mapean a los recursos físicos (subportadoras) de transmisión de la antena. Las subportadoras se agrupan en bloques de 12, independientemente del ancho de banda utilizado.

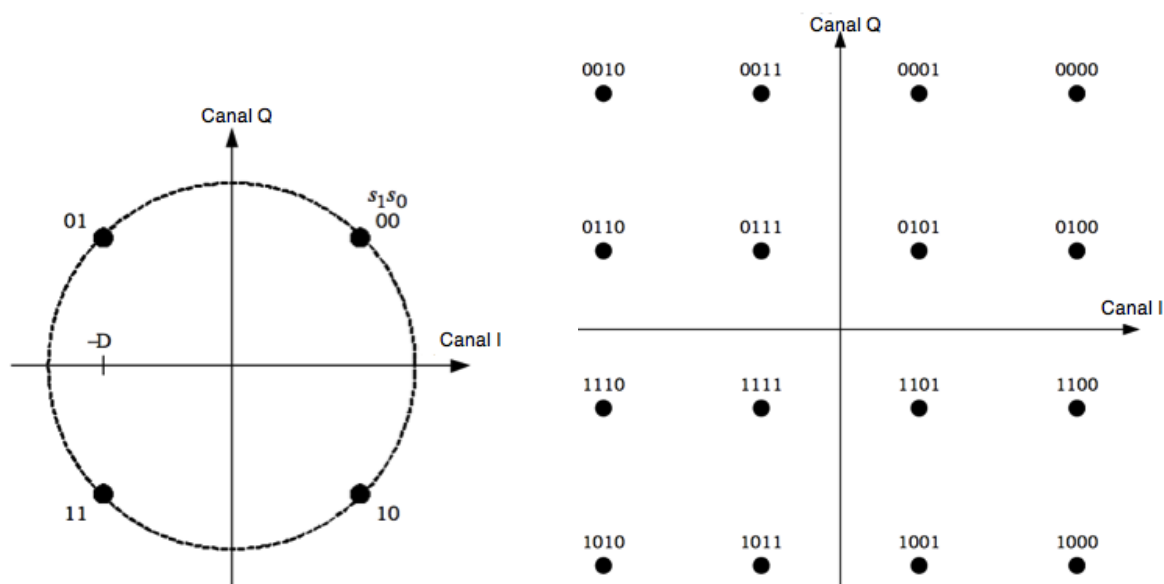


Figura 7. Constelaciones de modulaciones QPSK y 16-QAM.

2.2.8 Generación de la señal OFDM en banda base

Una señal OFDM comprende un máximo de 2048 subportadoras, espaciadas 15 KHz, por lo que la duración de un símbolo es de 66.7 μ s, con un prefijo cíclico de 4.69 μ s, lo cual permite que el sistema pueda resolver multitrayectorias de hasta 1.4 Km. Aunque es obligatorio que los equipos móviles tengan la capacidad de recibir las 2048 subportadoras, no todas necesitan transmitirse por la estación base, sólo se requiere transmitir 72 subportadoras.

2.3 Punto de conmutación de modo de transmisión

Uno de los principales beneficios de MBMS es el ahorro de recursos de red ya que un solo flujo de datos puede servir a múltiples usuarios. Dependiendo del número de usuarios que se han unido para recibir el contenido vía MBMS, la red puede seleccionar si utiliza transmisión punto-a-punto (unicast) o punto-a-multipunto (multicast).

En la transmisión punto-a-punto (P-P) se utilizan canales dedicados (DCH, Dedicated Channel) como mecanismo de transporte. Cada canal lleva el mismo contenido y cada uno tiene la capacidad de controlar la potencia de transmisión de la antena, de manera que se utilice sólo lo necesario para alcanzar al usuario en turno.

En la transmisión punto-a-multipunto (P-M) se utiliza un canal de acceso común llamado FACH (Forward Access Channel). La potencia de transmisión de la estación base es fija y es independiente del número de usuarios; se determina con base al área que se desea cubrir.

La transmisión P-M es eficiente cuando hay un gran número de usuarios en la celda, pero ineficiente cuando hay pocos. Sucede lo contrario con la transmisión P-P, es eficiente con pocos usuarios, y puede ser ineficiente si hay muchos.

El número de usuarios en una celda es variante en el tiempo, por lo que es conveniente cambiar de un modo de transmisión a otro de forma dinámica, para eficientar la operación de la red; a este momento se le llama “punto de conmutación de modo de transmisión”. La determinación del criterio de decisión para conmutar de un modo de transmisión a otro es un tópico abierto. Un enfoque propuesto en la literatura es predefinir

un número de usuarios (umbral) a partir del cual se debe realizar la conmutación de un método a otro. El valor del umbral se calcula asumiendo que todos los usuarios están distribuidos uniformemente en la celda, sin embargo, se debe considerar que algunos usuarios podrían estar al borde de la celda y otros muy cerca del transmisor. Esto es, si el umbral es 10 y actualmente solo hay 9 usuarios (distribuidos uniformemente), se seleccionará la transmisión P-P, lo que generaría un mayor consumo de potencia de transmisión a que si esos 9 usuarios se encuentran al borde de la celda. Por otro lado, si en la celda se encuentran 11 usuarios el sistema seleccionará la transmisión P-M, la cual requiere transmitir con la potencia suficiente para lograr cobertura en toda la celda; sin embargo podría existir un desperdicio de energía si los 11 usuarios se encuentran cerca de la estación base. Por lo anterior, es necesario identificar una nueva estrategia que permita al sistema decidir el cambio de modo de transmisión con base a la potencia de transmisión requerida para lograr la cobertura de los usuarios activos.

La potencia de transmisión total que se requiere para servir a múltiples usuarios a través de canales DCH es variable. Depende principalmente del número de usuarios, su ubicación (distancia a la estación base), y la tasa de transmisión y calidad de servicio (E_b/N_0) deseadas. Esta potencia de transmisión puede calcularse con la siguiente expresión:

$$P_T = \frac{P_P + \sum_{i=1}^n \frac{(P_N + x_i)}{W} L_{p,i}}{1 - \sum_{i=1}^n \frac{\frac{p}{(E_b/N_0)^{R_{b,i}}}}{\frac{p}{(E_b/N_0)^{R_{b,i}}}}} \quad (4)$$

donde P_T es la potencia total transmitida por la estación base, P_P es la potencia asignada a los canales de control comunes (señalización), $L_{p,i}$ son las pérdidas de propagación, $R_{b,i}$ es la tasa de transmisión, W es el ancho de banda del canal, P_N es el ruido de fondo, p es el factor de ortogonalidad, y x_i es la interferencia de las celdas vecinas hacia el i -ésimo usuario, que esta en función de la potencia transmitida por las celdas vecinas P_{Tj} ($j=1, \dots, K$) y las pérdidas por propagación de este usuario a la j -ésima celda L_{ij} , determinado por:

$$x_i = \sum_{j=1}^K \frac{P_{Tj}}{L_{ij}} \quad (5)$$

Por otro lado, dado que los canales FACH se utilizan para transmitir a múltiples usuarios, la potencia que se requiere para cumplir con una determinada calidad de servicio, debe ser constante en toda el área de cobertura de la celda, que generalmente será en el límite de cobertura deseado.

2.4 Multimedia Broadcast over Single Frequency Networks (MBSFN)

En MBSFN, múltiples estaciones base (cada una correspondiendo a una celda) transmiten simultáneamente el mismo contenido, de forma sincronizada, constituyendo un área MBSFN, como se muestra en la Figura 8 [Sälzer, 2011].

Todas las celdas dentro del área MBSFN contribuyen a la transmisión del contenido. Un equipo de usuario recibirá múltiples versiones de una misma señal, con diferente retardo, debido a esta transmisión multicelda. El receptor dará a estas múltiples señales el mismo tratamiento que se le da a una recepción con multitrayectorias, por lo que no agrega complejidad al equipo. De hecho, el receptor no necesita saber cuántas celdas componen el área MBSFN.

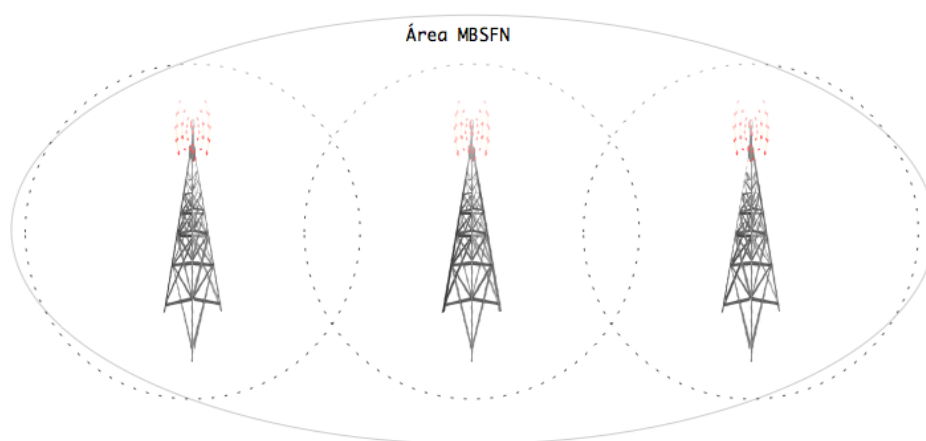


Figura 8. Área MBSFN

La transmisión en MBSFN mejora la relación señal a ruido, cuando se compara con MBMS [3GPP R1-071049, 2007]. Esto es especialmente útil en los bordes de las celdas, ya que mientras que en MBMS se produce una interferencia interceldas, en MBSFN es energía útil que se añade a la señal recibida de la estación más cercana. En general, MBSFN ofrece mejor desempeño comparado con las transmisiones P-P o P-M de una sola celda [3GPP R1-071049, 2007].

Al igual que en MBMS, en MBSFN se requiere determinar el momento de conmutar de un modo de transmisión a otro (P-P a P-M, y viceversa), y es lo que se estudiará en este trabajo de investigación.

Capítulo 3

Estándar FLO (Forward Link Only)

3.1 Introducción

La tecnología FLO fue diseñada específicamente para la distribución inalámbrica eficiente y económica de contenido multimedia a múltiples suscriptores simultáneamente [Qualcomm, 2007]. Esta tecnología permite la radiodifusión de video y audio en tiempo real o transmisión IP. Un sistema FLO se compone de cuatro subsistemas: el Centro de Operaciones de la Red (NOC, Network Operations Center), Transmisores MediaFLO, Red 3G, y dispositivos habilitados para FLO (también conocidos como Terminales MediaFLO). La Figura 9 muestra la arquitectura de un sistema FLO.

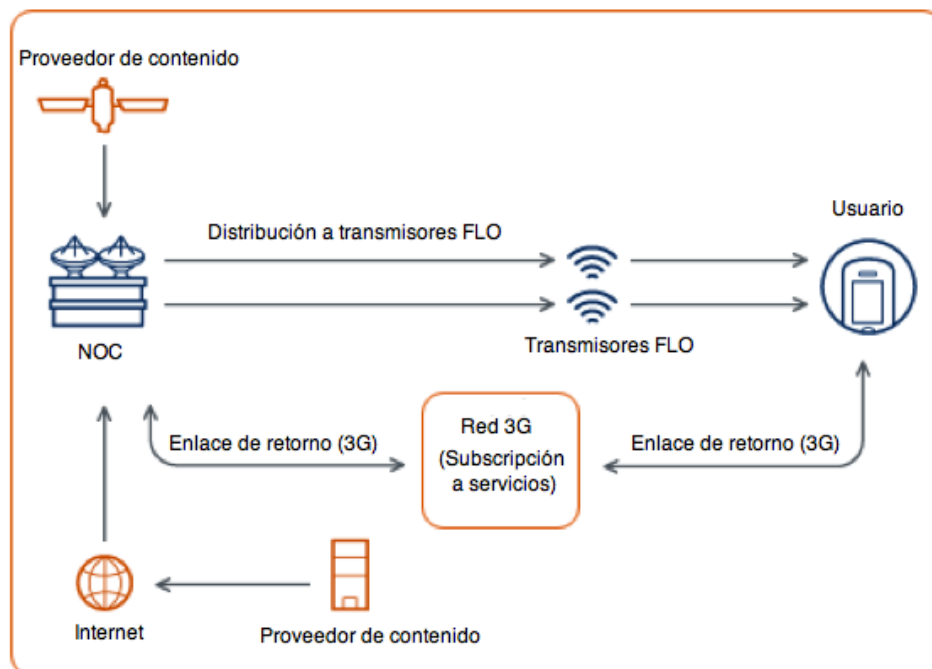


Figura 9. Arquitectura de FLO

El Centro de Operaciones de la Red consiste de un Centro de Operaciones Nacional (NOC) y de uno o más Centros de Operación Locales (LOC). El NOC gestiona la facturación, distribución e infraestructura de contenidos para la red. También gestiona varios elementos de la red y sirve como un punto de acceso para que los proveedores distribuyan su contenido e información sobre la guía de programación a los dispositivos móviles. También gestiona las suscripciones a servicios de los usuarios, la entrega de claves de acceso y llaves para la encriptación, y brinda información acerca de la facturación a los operadores de celulares. Los LOC sirven como punto de acceso para que los proveedores locales puedan distribuir contenido local a los dispositivos móviles en el área de mercado asociada.

Los transmisores FLO se encargan de entregar el contenido a los dispositivos móviles a través de formas de onda FLO multiplexadas con OFDM y moduladas en QPSK ó 16-QAM. Además, FLO utiliza Multiplexación por División de Tiempo (TDM) para transmitir contenido específico en intervalos de tiempo específicos, lo que permite que el receptor se pueda apagar durante estos intervalos y así ahorrar batería.

FLO utiliza una forma de transmisión jerárquica, o “en capas” (layering). Este método funciona enviando un flujo de contenido multimedia de ancho de banda pequeño con codificación robusta, el cual pueden recibir incluso los receptores en áreas de baja intensidad de la señal; mientras que un segundo flujo de contenido de mayor ancho de banda pero menos robusto se transmite en áreas con buena intensidad de señal. Esto permite tener 12 modos de operación los cuales se obtienen al variar la tasa de codificación del turbo código y el esquema de modulación en banda base utilizado. Desde su concepción, FLO se diseñó para operar bajo un esquema de Red de Frecuencia Única (SFN), por lo que los transmisores FLO se mantienen sincronizados.

La red 3G pertenece al operador móvil y apoya los servicios interactivos, de forma que los dispositivos móviles puedan comunicarse con el NOC y así facilitar las suscripciones a servicios y la distribución de accesos.

Los dispositivos habilitados con FLO pueden recibir señales FLO que contienen servicios de contenido bajo suscripción e información de la guía de programación. Los dispositivos habilitados para FLO son, principalmente, teléfonos celulares que en realidad

son dispositivos multipropósito que sirven como teléfonos, directorios telefónicos, navegadores de Internet, consolas de juegos, etc.

En este trabajo de investigación se hace un análisis del área de cobertura del estándar de video móvil FLO. Para la evaluación es necesario considerar los aspectos técnicos de su interfaz aérea, ya que influyen directamente en el desempeño del estándar ante un canal con ruido; por eso, en este capítulo se revisan los detalles más importantes.

3.2 Interfaz aérea de FLO

En FLO, la transmisión y recepción se basa en una versión de OFDM con 4096 (4k) subportadoras y la modulación de los símbolos puede ser QPSK ó 16-QAM. Para formar un canal de radiofrecuencia (RF) con un ancho de banda de 6 MHz, las 4k subportadoras ocupan un ancho de banda de 5.55 MHz, la cual también se conoce como tasa de chip. El espacio entre subportadoras se define por:

$$\Delta f = \frac{5.5MHz}{4096} = 1.35498 \text{ MHz} \quad (6)$$

La localización de las 4k subportadoras en banda base está dada por la siguiente ecuación:

$$f_i = (-2048 + i)\Delta f, \quad i = 0, 1, \dots, 4095 \quad (7)$$

donde Δf es el espaciamiento entre subportadoras.

De las 4096 subportadoras, 96 no se usan y se les llama portadoras de guarda. Los índices correspondientes a las portadoras de guarda son 0, ..., 47, 2048, 4049, ..., 4095, donde la portadora 2048 es la portadora de DC, y no se transmite. Las otras 95 subportadoras se colocan a cada lado como portadoras de guarda, mientras que a las 4000 subportadoras restantes se les llama subportadoras activas debido a que se modulan con datos o símbolos piloto.

En el dominio del tiempo, cada símbolo OFDM consiste en un número de muestras (en banda base) llamada chips OFDM. Estos chips se transmiten a una tasa de 5.55 MHz. El intervalo total de un símbolo OFDM, T_s , se compone de 4 partes:

$$T'_s = T_U + T_{FGI} + 2(T_{WGI}) \quad (8)$$

donde: $T_U = 4096 \text{ chips}$, $T_{FGI} = 512 \text{ chips}$, $T_{WGI} = 17 \text{ chips}$

En la Figura 10 se muestra el traslape de dos símbolos OFDM consecutivos, entonces el intervalo efectivo de un símbolo OFDM se define por $T_s = T_U + T_{FGI} + T_{WGI} = 4625 \text{ chips}$. El intervalo efectivo del símbolo OFDM para FLO sobre un canal RF con ancho de banda de 6 MHz es igual a $833.333 \mu\text{s}$ [TIA, 2006].

El prefijo cíclico es una fracción fija (1/8) del intervalo total del símbolo OFDM. La importancia del prefijo cíclico en un ambiente SFN es que en un canal con multitrayectorias se tiene muy poca interferencia interportadora (ICI, Inter Carrier Interference) y muy poca interferencia intersimbólica (ISI, Inter Symbolic Interference) en el receptor. La Tabla I muestra el número de símbolos OFDM por segundo y la distancia entre portadoras para diferentes ancho de banda del canal de RF.

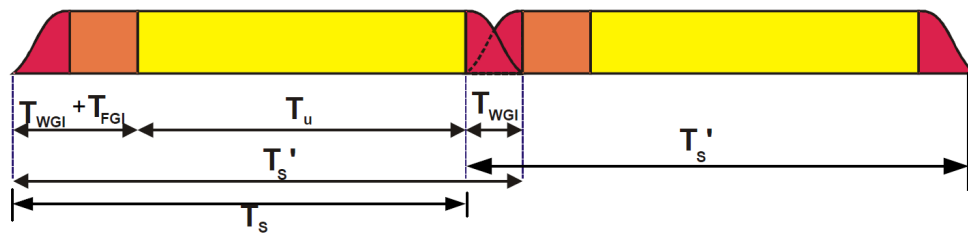


Figura 10. Estructura en el tiempo de un símbolo OFDM.

Tabla I. Número de símbolos OFDM por segundo y distancia entre portadoras para diferentes ancho de banda del canal de RF.

Ancho de banda del canal (MHz)	Número de subportadoras	Prefijo cíclico (muestras)	Símbolos OFDM/seg.	Distancia entre portadoras (KHz)
5	4096	512	1000	1.129150391
6	4096	512	1200	1.354980469
7	4096	512	1400	1.580810547
8	4096	512	1600	1.806640625

3.3 Generación del canal de datos (MLC¹)

En la Figura 11 se muestran los diferentes procesos para la generación de un canal de datos de usuario, Multicast Logical Channel (MLC). Cada proceso se explica a detalle en las siguientes secciones.

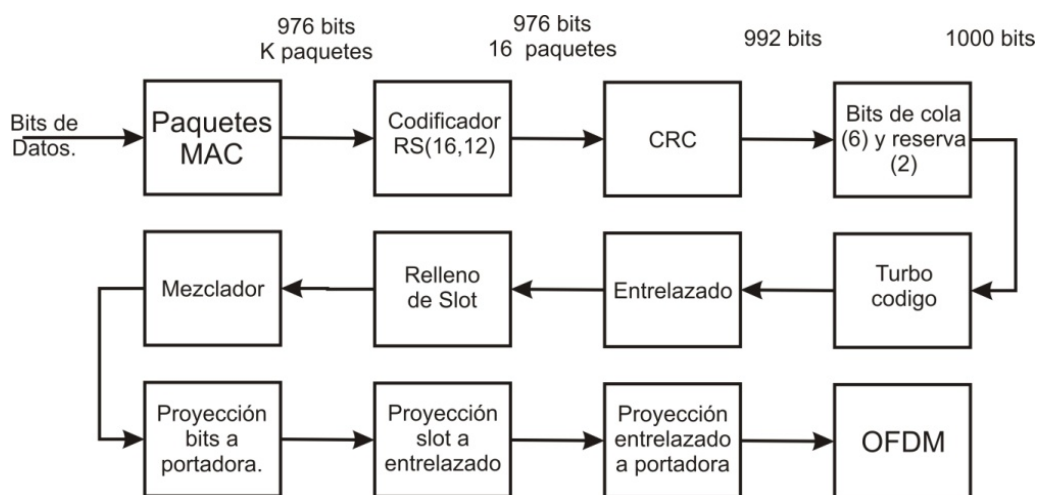


Figura 11. Generación de canal de datos multimedia de usuario.

¹ MLC: Multicast Logical Channels

3.3.1 Codificador Reed-Solomon

El primer paso para generar un MLC es formar paquetes MAC (Medium Access Control) de 976 bits. Posteriormente, se toman K paquetes de capa MAC para realizar la codificación Reed-Solomon (R-S) de la siguiente manera: los bits de los paquetes MAC se agrupan en octetos, y la codificación Reed-Solomon se realiza en cada columna de K octetos para producir palabras código de N octetos. Los octetos de paridad de cada columna forman N-K paquetes nuevos que se ubican después de los primeros K paquetes MAC; este proceso se ilustra en la Figura 12 [TIA, 2006].

3.3.2 CRC (Cyclic Redundancy Check, Código de Redundancia Cíclica)

Después de la codificación Reed-Solomon, se generan 16 bits de CRC por cada renglón usando el generador polinomial estándar CRC-CCITT [TIA, 2006]:

$$g(x) = x^{16} + x^{12} + x^5 + 1 \quad (9)$$

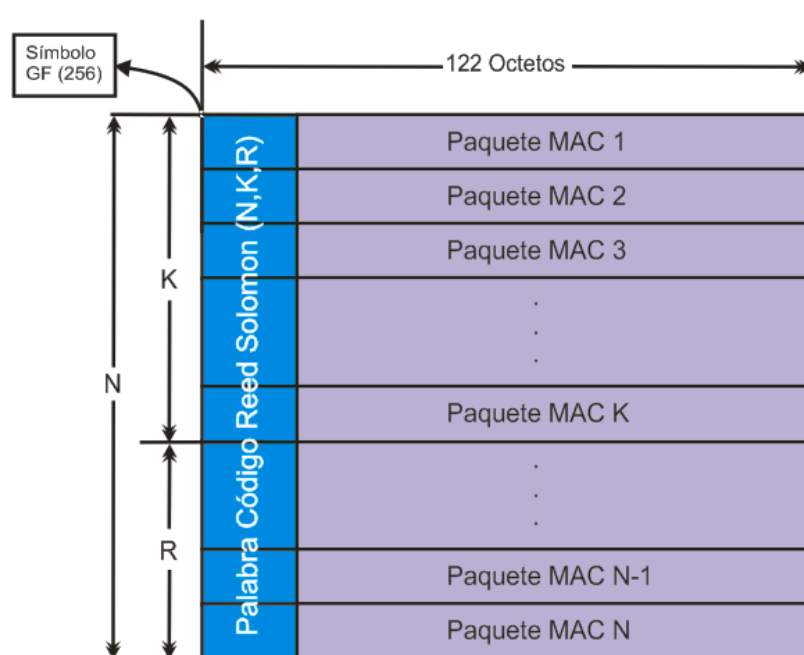


Figura 12. Ilustración de la codificación Reed-Solomon.

Este CRC se utiliza en el receptor para determinar cuáles paquetes se decodificaron correctamente y si se aplica o no la corrección de la información mediante el decodificador Reed-Solomon. Además de los bits del CRC, a cada renglón del bloque Reed-Solomon se le agregan 2 bits reservados y una cola de 6 bits en cero, con esto, cada renglón del bloque RS constará de 1000 bits. Este paquete se denomina de turbo información o paquete de capa física (Physical Layer Packet, PLP) (Figura 13).

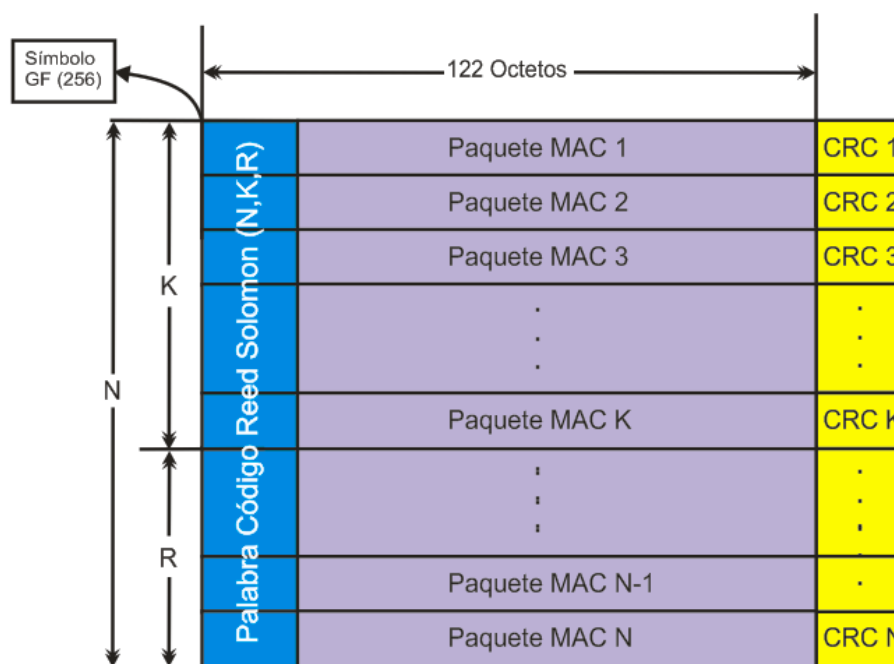


Figura 13. Aplicación del CRC y bits de cola.

3.3.3 Turbo código

Los PLPs se codifican mediante un turbo codificador también llamado codificador interno (el codificador Reed-Solomon es el codificador externo). El propósito principal del codificador interno es explotar la diversidad en frecuencia inherente del canal, la estructura de este codificador también se usa en CDMA 2000 [3GPP2, 2004].

FLO soporta múltiples tasas de transmisión, para ello utiliza diferentes tasas de turbo codificación: 1/3, 1/2, 2/3. La operación de codificación se lleva a cabo en bloques, donde cada paquete en la entrada genera un único paquete a la salida. En la Figura 14 se

muestra la estructura del turbo codificador utilizado, cuya tasa de salida depende directamente del proceso de recortado (cuantos bits se toman a la salida, es decir, algunos se desechan). Su función de transferencia se expresa con la siguiente ecuación:

$$G(D) = \left[1 \quad \frac{n_o(D)}{d(D)} \quad \frac{n_1(D)}{d(D)} \right] \quad (10)$$

donde: $d(D) = 1 + D^2 + D^3$, $n_o(D) = 1 + D + D^3$, y $n_1(D) = 1 + D + D^2 + D^3$ siendo D el estado de los flip-flop [TIA, 2006].

3.3.4 Entrelazado de bits (Bit interleaving)

La información que sale del codificador interno se entrelaza antes de la modulación en símbolos, con el objetivo principal de que dos bits consecutivos experimenten desvanecimientos no correlacionados, y explotar la diversidad en frecuencia que ofrece OFDM.

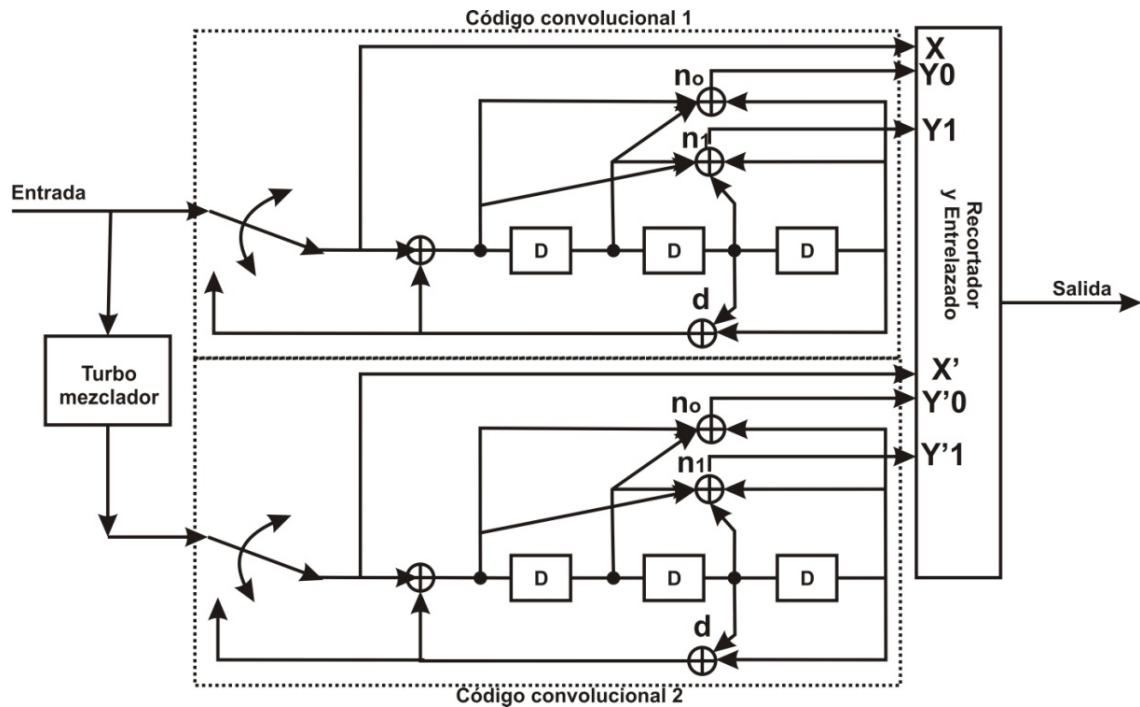


Figura 14. Turbo Codificador (TIA, 2006).

Los bits de salida de cada bloque de turbo código se mezclan de tal manera que:

- Los bits codificados en posiciones adyacentes se sitúan en diferentes símbolos de la constelación.
- Para la modulación 16QAM, los bits adyacentes se sitúan alternadamente en la posición del bit más fiable en la constelación.

Para llevar a cabo la operación de entrelazado se requiere de un buffer de entrelazado que consiste en $N/4$ renglones por 4 columnas, donde N representa el número de bits de paquete a la salida del turbo código, el cual depende de la tasa de recortado que se utilice en el turbo codificador en el MLC; la Figura 15 muestra un ejemplo para 20 bits [TIA, 2006].

3.3.5 Relleno de los buffers de ranura

La unidad más pequeña de ancho de banda que se asigna a un MLC sobre un símbolo OFDM corresponde a un grupo de 500 constelaciones. Para modulación QPSK, 500 constelaciones representan 1000 bits mientras que para 16QAM representan 2000 bits. En un símbolo OFDM existen 7 ranuras para transmitir múltiples paquetes turbo codificados de uno o más MLC [TIA, 2006].

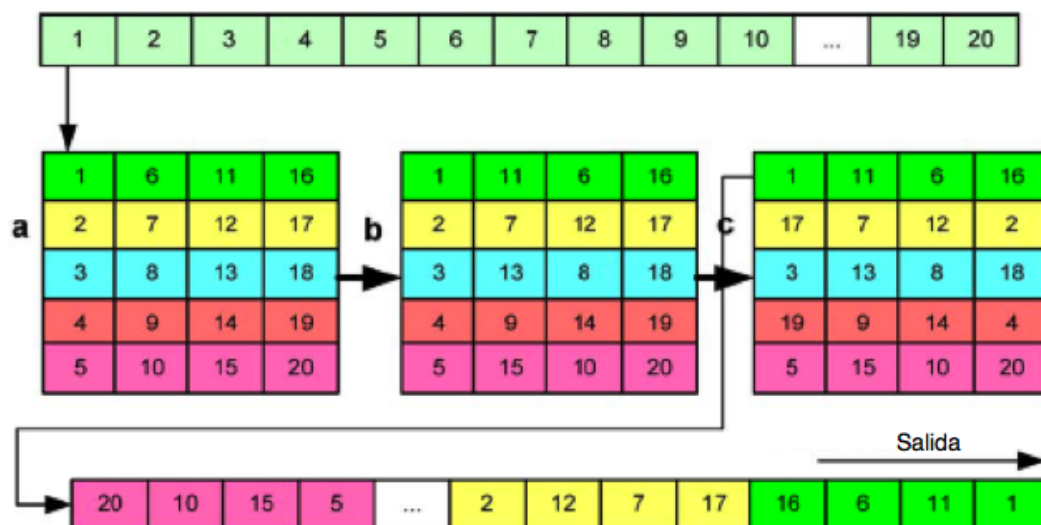


Figura 15. Proceso de entrelazado de bits.

3.3.6 Modulación en subportadoras

En FLO existen tres esquemas de modulación: QPSK, 16QAM y modulación por capas. En la modulación QPSK se utilizan 2 bits codificados, en modulación 16QAM se utilizan 4 bits codificados, mientras que en la codificación por capas se requieren 2 bits para la capa base y 2 bits para la capa mejorada, las cuales corresponden a colas de bits procesados de forma independiente. Los bits de la capa base definen el cuadrante de una constelación 16QAM, mientras que los bits de la capa mejorada definen el puente dentro del cuadrante, de esta manera se tiene más probabilidad de error en los bits que viajan en la capa mejorada que los que viajan en la capa base.

3.3.7 Proyección de ranura al entrelazado

Tanto la posición 2 como la posición 6 del entrelazado se utilizan alternadamente para las portadoras piloto en los símbolos OFDM. Las portadoras pilotos se almacenan en dos símbolos OFDM para duplicar la capacidad de estimación de canal de 512 chips a 1024 chips. Así se incrementa la capacidad de estimación del canal a dos veces el prefijo cíclico. Lo cual es importante ya que se busca que se provea buen desempeño incluso cuando el perfil de retardos exceda el tiempo de prefijo cíclico.

Como resultado del espacio ocupado por los símbolos piloto, sólo se pueden entrelazar 7 ranuras de datos MLC en un símbolo OFDM. La ranura cero siempre se usa para los símbolos pilotos y el resto para los datos de los MLC [TIA, 2006], como se observa en la Figura 16.

3.3.8 Proyección de entrelazado en subportadoras

En cada símbolo OFDM de FLO existen 4000 subportadoras activas. Como se mencionó anteriormente, estas subportadoras están divididas en bloques de 500 subportadoras, a las cuales se les llama entrelazados. El índice del entrelazado va de 0 a 7, y se colocan de manera consecutiva en las subportadoras [TIA, 2006], como se puede observar en la Figura 17.

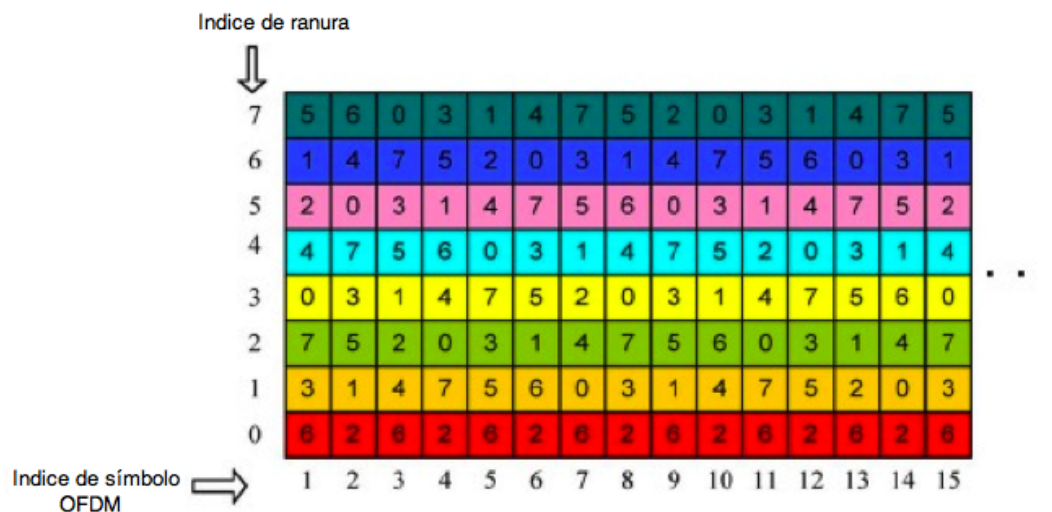


Figura 16. Proyección de ranuras a entrelazado.

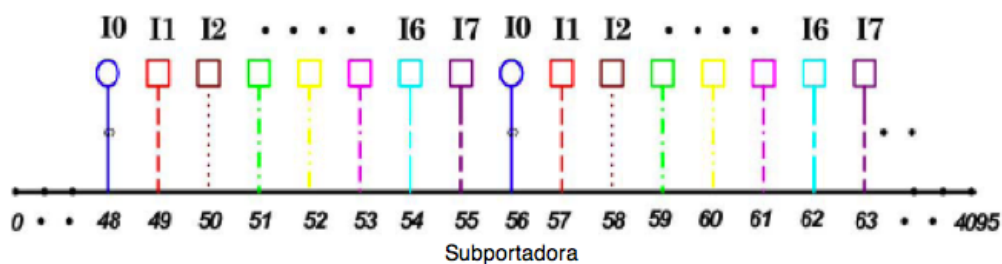


Figura 17. Estructura del entrelazado en las portadoras activas.

3.3.9 Modos de operación de FLO

Con la combinación de las características descritas en los tipos de modulación y tasa de turbo codificación, se pueden obtener diferentes modos de operación los cuales se presentan en la Tabla II.

Tabla II. Modos de operación de la capa física de FLO.

Modo	Modulación	Tasa turbo código	Tasa de transmisión (Mbps)	Eficiencia Espectral	C/N requerido (dB) para AWGN
0	QPSK	1/3	2.8	0.47	-0.4
1	QPSK	1/2	4.2	0.7	1.8
2	16-QAM	1/3	5.6	0.93	4.5
3	16-QAM	1/2	8.4	1.4	7.3
4	16-QAM	2/3	11.2	1.86	10
5	QPSK	1/5	OIS	OIS	-3
6	layered (ER=4.0)	1/3	5.6	0.93	1.5(B), 6.6(E)
7	layered (ER=4.0)	1/2	8.4	1.4	4.8(B), 9.0(E)
8	layered (ER=4.0)	2/3	11.2	1.86	8.3(B),11.5(E)
9	layered (ER=6.25)	1/3	5.6	0.93	0.8(B), 7.8(E)
10	layered (ER=6.25)	1/2	8.4	1.4	3.6(B),10.5(E)
11	layered (ER=6.25)	2/3	11.2	1.86	6.6(B),12.6(E)

Capítulo 4

Canal radio

En este capítulo se presenta la caracterización del canal radio, y se describen las características clave de las redes de frecuencia única, utilizadas por los esquemas de transmisión multicast/broadcast de video móvil.

4.1 Introducción

En el proceso de diseño, planeación y despliegue de una red inalámbrica se deben considerar la mayor cantidad de aspectos posibles, tales como potencia de transmisión, distancias, y sensibilidad del receptor [Matolak, 2011] ya que estos determinan, entre otros, el área de cobertura. Para realizar una caracterización del canal radio se deben distinguir tres fenómenos importantes [Prasad, 2004]:

1. Pérdidas por propagación.
2. Sombreo o desvanecimiento.
3. Interferencia multitrayectoria.

Las pérdidas por propagación describen la potencia promedio que se recibe en un determinado lugar en función de su distancia al transmisor, mientras que el sombreado o desvanecimiento describe las fluctuaciones de esa potencia promedio. Las multitrayectorias son efecto de reflexiones y refracciones de la señal al propagarse por el ambiente, las cuales pueden causar interferencia al arribar al receptor. Existen diferentes modelos matemáticos que representan estos fenómenos que sufre la señal; a continuación se describirán brevemente los modelos utilizados en esta investigación.

4.2 Modelo de Hata para pérdidas por propagación

El modelo de Hata para el cálculo de pérdidas por propagación predice la atenuación total a lo largo de un enlace de microondas terrestre o de algún otro tipo de

comunicaciones celulares [Hata, 1980]. Se seleccionó el modelo de Hata ya que es un método que es rápido de calcular (requiere un tiempo de computación corto) [Blaunstein, 1999] al requerir sólo cuatro parámetros de entrada. También se tomó en cuenta que presenta la ventaja de aplicar una fórmula general para ambientes urbanos y factores de corrección para ambientes semiurbanos y rurales. Esto es especialmente útil para la caracterización de áreas metropolitanas con desarrollos suburbanos o rurales en su periferia.

La expresión analítica del modelo de Hata para las pérdidas promedio por trayectoria para una zona urbana, se expresa como sigue:

$$L_{50} = 69.55 + 26.16 \log f_0 - 13.82 \log h_T - a(h_R) + (44.9 - 6.55 \log h_T) \log d \quad (11)$$

donde:

$150 \leq f_0 \leq 1500 \text{ MHz}$ (frecuencia de operación),

$30 \leq h_T \leq 200 \text{ m}$ (altura de la antena del transmisor),

$1 \leq h_R \leq 10 \text{ m}$ (altura de la antena del receptor), y

$1 \leq d \leq 20 \text{ Km}$ (distancia entre transmisor y receptor).

El término $a(h_R)$ es un factor de corrección para la altura de la antena que depende del tipo de ambiente; en el caso de una ciudad mediana a pequeña:

$$a(h_R) = (1.1 \log f_0 - 0.7)h_R - (1.56f_0 - 0.8) \quad (12)$$

Para ciudades de tamaño grande:

$$a(h_R) = 8.29(\log 1.54h_R)^2 - 1.1, \quad f_0 \leq 300 \text{ MHz} \quad (13)$$

$$a(h_R) = 3.2(\log 11.75h_R)^2 - 4.97, \quad f_0 \geq 300 \text{ MHz} \quad (14)$$

El cálculo de (8) para áreas suburbanas requiere un ajuste de acuerdo a la siguiente expresión:

$$L_{50} = L_{50}(\text{urbana}) - 2 \left[\log \left(\frac{f_0}{28} \right) \right]^2 - 5.4 \quad (15)$$

Mientras que para áreas abiertas y rurales el ajuste es como sigue:

$$L_{50} = L_{50}(\text{urbana}) - 4.78[\log f_0]^2 + 18.33 \log f_0 - 40.94 \quad (16)$$

4.3 Modelo de Zheng y Xiao para desvanecimiento de la señal

En las comunicaciones inalámbricas, el desvanecimiento de una señal ocurre cuando ésta se difracta o refleja por algún objeto presente en el ambiente, antes de su arribo al receptor. El desvanecimiento puede variar con el tiempo, la posición geográfica, o la frecuencia de operación, y analíticamente se modela como un proceso aleatorio. En este trabajo se seleccionó el modelo de desvanecimiento propuesto por [Zheng y Xiao, 2003] ya que tiene una convergencia más rápida y con propiedades estadísticas mejores para la representación correcta del efecto, comparado con otros modelos, como el de [Jakes, 1994] o el de [Pop y Beaulieu, 2001].

De acuerdo con este modelo, el proceso de desvanecimiento normalizado se puede definir como la suma de señales sinusoidales y se representa como:

$$\mu(t) = \mu_C(t) + j\mu_S(t) \quad (17)$$

donde:

$$\mu_C(t) = \frac{2}{\sqrt{M}} \sum_{n=1}^M \cos(\psi_n) \cos(\omega_d t \cos \alpha_n + \phi) \quad (18)$$

$$\mu_S(t) = \frac{2}{\sqrt{M}} \sum_{n=1}^M \sin(\psi_n) \cos(\omega_d t \cos \alpha_n + \phi) \quad (19)$$

$$\alpha_n = \frac{2\pi n - \pi + \theta}{4M}, n = 1, 2, 3, \dots, M \quad (20)$$

donde θ , ϕ y ψ_n son valores estadísticamente independientes y uniformemente distribuidos en el intervalo $[-\pi, \pi]$ para toda n , y ω_d es la frecuencia Doppler en radianes.

4.4 Modelo de canal COST 207 para multitrayectorias

El fenómeno de propagación de una señal inalámbrica por múltiples trayectorias trae como consecuencia que la señal de interés arribe al receptor mas de una vez. Algunas causas de la propagación multitrayectoria son la reflexión y refracción en la ionósfera, y la reflexión en objetos terrestres tales como edificios y montañas. Los efectos de la propagación multitrayectoria incluyen interferencia constructiva o destructiva, y

desfasamiento de la señal, resultando en una señal afectada por un canal selectivo en frecuencia y variante en el tiempo, que se representa como la suma de L trayectorias de propagación, dada por [Pätzold, 2002]:

$$\tilde{h}(\tau', t) = \sum_{\ell=0}^{L-1} \tilde{\alpha}_{\ell} \tilde{\mu}_{\ell}(t) \delta(\tau' - \tilde{\tau}'_{\ell}) \quad (21)$$

donde:

ℓ es el número de la multitrayectoria,

$\tilde{\alpha}_{\ell}$ es la potencia promedio de la multitrayectoria,

$\tilde{\mu}_{\ell}(t)$ es un proceso de desvanecimiento determinístico, y

$\delta(\tau' - \tilde{\tau}'_{\ell})$ representa el retardo de la multitrayectoria con respecto a la primera.

En 1984 la CEPT² creó el grupo de trabajo COST³, el cual desarrolló modelos de canal apropiados para los ambientes de propagación típicos. Los ambientes de propagación típicos son clasificables en: áreas con carácter rural (RA: Rural Area), áreas típicas para ciudades y suburbios (TU: Typical Urban), áreas urbanas densamente construidas con malas condiciones de propagación (BU: Bad Urban), y áreas con terreno montañoso (HT: Hilly Terrain); en este trabajo de tesis solo se utilizan los tres primeros. El grupo de trabajo COST determinó las especificaciones de potencia promedio y retardo de propagación para cada uno de los ambientes de propagación típicos, las cuales se presentan en las tablas III, IV, y V [Pätzold, 2002] [Falli, 1989]. Estas fueron resultado de mediciones llevadas a cabo en diferentes países.

² CEPT: Conference of European Posts and Telecommunications Administration

³ COST: European Cooperation in the Field of Science and technical research.

Tabla III. Especificaciones de canal COST 207 para áreas rurales.

No. de trayectoria L	Retardo de propagación (μS)	Potencia promedio	
		$\sigma^2(\text{Lineal})$	(dB)
0	0	1	0
1	0.1	0.4	-4
2	0.2	0.16	-8
3	0.3	0.06	-12
4	0.4	0.03	-16
5	0.5	0.01	-20

Tabla IV. Especificaciones de canal COST 207 para áreas urbanas.

No. de trayectoria L	Retardo de propagación (μS)	Potencia promedio	
		$\sigma^2(\text{Lineal})$	(dB)
0	0	0.5	-3
1	0.2	1	0
2	0.5	0.63	-2
3	1.6	0.25	-6
4	2.3	0.16	-8
5	5	0.1	-10

Tabla V. Especificaciones de canal COST 207 para áreas urbanas densamente construidas.

No. de trayectoria L	Retardo de propagación (μS)	Potencia promedio	
		$\sigma^2(\text{Lineal})$	(dB)
0	0	0.20	-7
1	0.2	0.50	-3
2	0.4	0.79	-1
3	0.8	1.00	0
4	1.6	0.63	-2
5	2.2	0.25	-6
6	3.2	0.20	-7
7	5	0.79	-1
8	6	0.63	-2
9	7.2	0.20	-7
10	8.2	0.10	-10
11	10	0.03	-15

4.5 Redes de Frecuencia Única (SFN).

Una Red de Frecuencia Única (Single Frequency Network, SFN) es una red tipo broadcast en la cual todos los transmisores se sincronizan para transmitir la misma señal a la misma frecuencia, de tal modo que las terminales reciben la misma señal proveniente de varios transmisores. Gracias a la utilización de la modulación OFDM (con un número elevado de portadoras moduladas a tasas binarias bajas que permiten periodo de símbolos muy largos), y la inserción de un periodo de guarda T_g , las señales recibidas dentro del

intervalo de guarda contribuyen positivamente a la señal útil. Esto proporciona una ganancia por diversidad, también conocida como ganancia de red SFN (SFN *network gain*), especialmente útil para mejorar la cobertura en entornos urbanos. Por otro lado, las señales que arriban con un retardo mayor que el intervalo de guarda crean interferencia destructiva (*self interference*) [Gómez Barquero et al, 2007] [Malmgren, 1999].

En una red SFN con varios transmisores X_n , la señal recibida $y(t)$ puede ser modelada por la siguiente ecuación:

$$y(t) = \sum_{i=1}^n x_i(t) \otimes h_i(t) + n(t) \quad (22)$$

donde:

$\otimes$ denota la convolucion,

$x(t)$ es la señal OFDM transmitida,

$h(t)$ es la respuesta al impulso del canal, y

$n(t)$ es el ruido aditivo blanco gaussiano (AWGN).

Dado que la misma señal $x(t)$ es recibida con diferente retardo τ_n , es decir:

$$x_n(t) = x(t - \tau_n) \quad (23)$$

se obtiene:

$$y(t) = x(t) \otimes \sum_{i=1}^n h_n(t - \tau_n) + n(t) \quad (24)$$

Por lo tanto, el modelo de transmisión de una red SFN es similar al modelo de transmisión de un transmisor y un receptor a través de un canal con multitrayectorias (ecuación 18).

En una red SFN de tres transmisores, como la mostrada en la Figura 18, se tienen tres casos de interés [Arthur, 2007]:

a) Las señales de los tres transmisores arriban al mismo tiempo, este el caso ideal, en el que se obtiene interferencia constructiva, es decir una ganancia de red máxima.

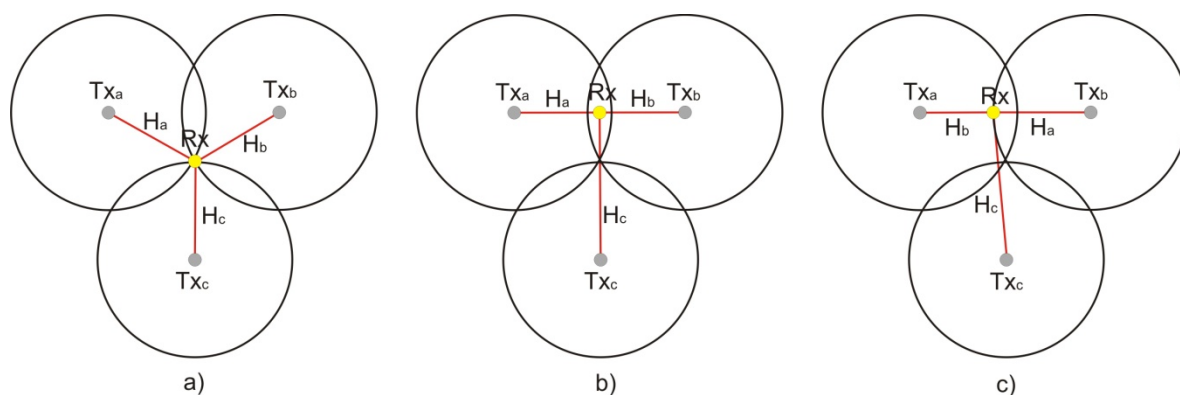


Figura 18. Casos de interés en una red SFN de tres transmisores.

b) Dos señales arriban al mismo tiempo mientras que la tercera llega retardada. En este caso, si el retardo es menor que el valor del prefijo cíclico, aún se experimenta interferencia constructiva, de otro modo la contribución puede ser negativa.

c) Es el caso general, en el que las tres señales arriban al receptor en diferentes tiempos; la interferencia de dos de las señales puede ser constructiva o destructiva, dependiendo de la magnitud del retardo con respecto a la primera señal en arribar.

Capítulo 5

Arquitectura de simulación

En este capítulo se describe la arquitectura del modelo de simulación desarrollado para lograr los objetivos de esta tesis.

5.1 Diseño de la arquitectura de simulación

Una vez que se identificaron las principales características técnicas del canal radio, de las redes de frecuencia única y de los estándares de video móvil MBSFN y FLO, se desarrolló una arquitectura de simulación que permitiera lo siguiente:

1. Simular el canal de comunicación inalámbrico para los ambientes de propagación rural, urbano, y urbano denso.
2. Determinar los puntos de conmutación de modo de transmisión (unicast a multicast/broadcast, o viceversa) en una red de frecuencia única que utilice el estándar MBSFN, para diferentes ambientes de propagación.
3. Determinar el área de cobertura de una red de frecuencia única que utilice el estándar FLO, para diferentes ambientes de propagación.

La arquitectura diseñada se muestra en la Figura 19.

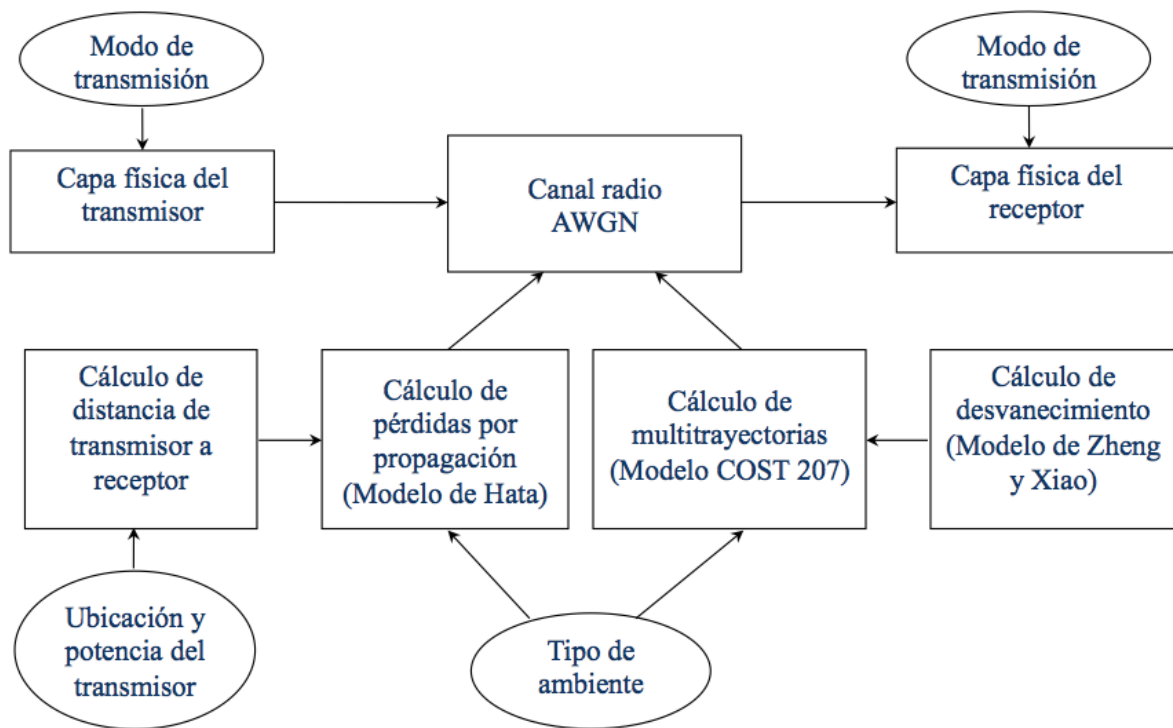


Figura 19. Arquitectura de simulación.

Los aspectos más importantes de esta arquitectura se describen a continuación. Los bloques “Capa física del transmisor” y “Capa física del receptor” pueden consistir de alguno de los dos estándares que se han revisado en este trabajo, MBMS y FLO, lo cual hay que indicarlo en el parámetro de entrada “Modo de transmisión”. En el caso del estándar FLO, también se debe especificar cuál de los diferentes modos de transmisión (0, 1, 2, 3 ó 4) se desea simular, ya que cada uno de ellos es diferente en cuanto a la modulación y codificación de los datos (como se mostró en la Tabla II); este parámetro se utiliza tanto para el transmisor como para el receptor. También es necesario indicar el tipo de ambiente que se desea evaluar (rural, urbano o urbano denso), ya que los modelos de Hata y COST 207 varían según este parámetro, de acuerdo a lo revisado en el capítulo 4. Y por último, se debe indicar el número, la ubicación y potencia de cada uno de los transmisores que conforman la red SFN. Durante la evaluación, la ubicación y potencia de estos transmisores permanece fija, al contrario del receptor, el cual se va colocando en

diferentes puntos del área de cobertura de la red, de manera que es posible obtener un mapa (footprint, en inglés) de la calidad de la señal en diferentes puntos del área de cobertura.

Una vez que se han definido los parámetros de operación, el bloque “Capa física del transmisor” realiza todos los procesos para generar una señal de MBMS o FLO, según el estándar definido (de acuerdo a lo revisado en los capítulos 2 y 3). Esta señal se transmite de forma simultánea por los diferentes transmisores de la red y es afectada por las pérdidas por propagación, por desvanecimientos y por multitrayectorias (aplicando lo analizado en el capítulo 4). Para las pérdidas por propagación primeramente se calcula cada una de las distancias de los transmisores de la red SFN hacia el receptor, ya que se requiere como parámetro de entrada para el modelo de Hata. Todas las multitrayectorias resultantes (según el tipo de ambiente de propagación y de acuerdo al modelo COST 207) se ven afectadas por procesos de desvanecimiento (de acuerdo al modelo de Zheng y Xiao); esto se aplica para cada uno de los transmisores de la red. A todos estos efectos se suma además el ruido blanco gaussiano (AWGN), causando todo en conjunto interferencia constructiva y destructiva, la cual es evaluada una vez que el receptor realiza el proceso de recuperación de la señal transmitida originalmente.

5.2 Implementación de la arquitectura de simulación en Matlab

La arquitectura de simulación diseñada se implementó en el simulador Matlab 2008a de forma modular, de manera que, en el futuro, facilite su adaptación a otros estándares de video similares a los utilizados en esta investigación. La Figura 20 muestra un diagrama a bloques general del modelo de simulación en Matlab.

Como se observa, primeramente hay un bloque que genera bits para simular los datos a transmitir; se utiliza un generador de datos binario Bernoulli con probabilidad de $\frac{1}{2}$ para un “0” y $\frac{1}{2}$ para un “1”. Para MBMS, el bloque “Codificación de bits” comprende el cálculo del CRC, la aplicación del turbo código, así como el entrelazado, igualación y mezclado de bits, como se describen en las secciones 2.2.1 a 2.2.4. Para FLO, este bloque comprende la codificación Reed-Solomon, el cálculo del CRC, la agregación de los bits de cola, la aplicación del turbo código, así como el entrelazado de bits, el relleno de los buffers, según lo descrito en las secciones 3.3.1 a 3.3.6.

El bloque “Modulación en banda base”, para el caso de MBMS, consiste en realizar la modulación QPSK, 16QAM ó 64QAM, la precodificación, y el mapeo a elementos de los recursos (ver secciones 2.2.5 a 2.2.7); mientras que para FLO consiste en realizar la modulación QPSK ó 16QAM, la proyección al entrelazado y a las subportadoras (ver secciones 3.3.6 a 3.3.8).

En el bloque “Multicanalización en OFDM” se prepara la señal OFDM de acuerdo a la frecuencia central y número de subportadoras de cada estándar, con lo cual se tiene lista la señal que se pasa al bloque “Canal radio”, el cual modifica la señal transmitida de acuerdo a los fenómenos mencionadas en el capítulo 4.

En el receptor se realizan los procesos inversos (demulticanalización OFDM, demodulación en banda base y decodificación de bits) para tratar de recuperar los datos originales, con lo cual se puede realizar el cálculo de bits erróneos (BER, Bit Error Rate).

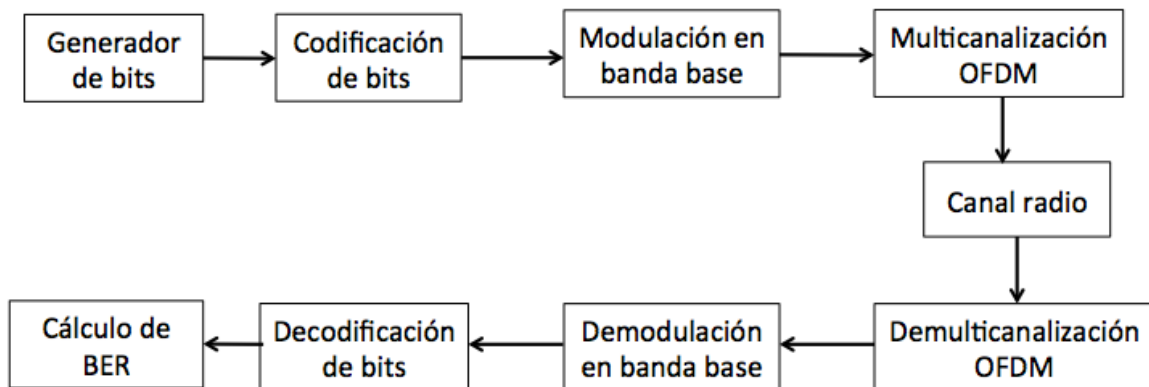


Figura 20. Bloques del modelo de simulación en Matlab 2008a.

Actualmente, el cambio de los parámetros para distinguir entre el estándar MBMS y FLO se hace directamente en el código, pero en un futuro se puede diseñar una interfaz gráfica que facilite este proceso.

Los parámetros para ejecutar las diferentes simulaciones realizadas se especifican en las siguientes subsecciones.

Capítulo 6

Resultados: MBMS y MBSFN

En este capítulo se presentan los resultados de la evaluación del estándar MBMS. El objetivo es determinar el punto de conmutación de modo transmisión unicast a multicast para diferentes ambientes de propagación (rural, urbano, urbano denso), de manera que se cuente con referencias para este parámetro, al momento de diseñar una red de video móvil con este estándar.

6.1 Simulación para obtención de valores de referencia iniciales

El primer paso de esta parte de la simulación fue obtener datos que se utilizarán como referencia iniciales, y que se pueden comparar los disponibles en [Alexiou, 2007]. Para ello se configuró una topología de red como la mostrada en la Figura 21, que consta de una celda central, rodeada primeramente por un anillo de 6 celdas y posteriormente por otro de 12 celdas; el efecto de celdas mas allá de esta distancia no es significativo. Los parámetros de operación de esta red se resumen en la Tabla VI, los cuales son los mismos a los utilizados en [Alexiou, 2007], para fines de comparación de resultados.

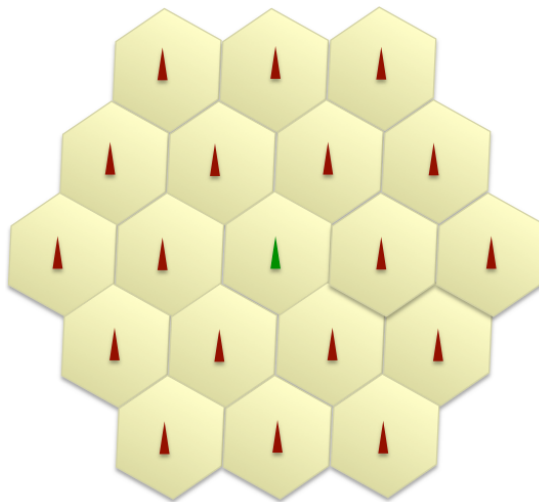


Figura 21. Topología para obtención de valores de referencia iniciales.

Tabla VI. Parámetros de operación de red MBMS.

Parámetro	Valor
Distancia entre estaciones base	1 Km
Radio de la celda	0.577 Km
Potencia Tx máxima (celda de interés)	20 W
Potencia Tx otras celdas	5 W
BER objetivo	1%
Canal	Okumura-Hata

Dado que en [Alexiou, 2007] se presentan resultados para radios de cobertura de 50%, 75% y 95%, en este trabajo de investigación también se analizaron estos casos, con fines comparativos. Un radio de cobertura del 50% indica que sólo en el 50% del área total que debe cubrir la antena transmisora es posible recibir el servicio, y análogamente son los radios de cobertura de 75% y 95%. En el modelo de simulación se fue aumentando el número de usuarios distribuidos aleatoriamente dentro de estos radios de cobertura y se midió la potencia total requerida por la estación base para obtener un BER de 1% en los usuarios móviles; el umbral del BER de 1% es para tener la misma referencia que [Alexiou, 2007]. En la Figura 22 se muestran los resultados para los dos tipos de canales de interés, los de acceso dedicado (DCH) y los de acceso común (FACH). El eje horizontal representa el número de usuarios accedando el servicio en un momento específico, mientras que el eje vertical representa la potencia total requerida para dar servicio a esa cantidad de usuarios.

Como se puede observar, para los canales de acceso común (FACH) se requiere una potencia constante, independientemente de la cantidad de usuarios y de su ubicación geográfica, ya que el objetivo con este tipo de canales es lograr un área de cobertura determinado (50, 75 y 95% en estas simulaciones). Por otro lado, se observa que la potencia requerida por los canales de acceso dedicado (DCH) se incrementa conforme

incrementa el número de usuarios que desean recibir el contenido. El incremento es relativamente lineal, y depende de la ubicación de los usuarios que se van agregando a la recepción de la señal: si se encuentran cerca de la estación base la potencia extra que se requiere para dar el servicio a estos nuevos usuarios es poca, pero si se encuentran en el límite de la cobertura la potencia adicional es mucha, comparativamente. Por ejemplo, para una cobertura con canales DCH del 95% del área, cuando hay 16 usuarios la antena transmite con 14.5 W, y cuando se agregan dos usuarios mas se requieren 18.2 W (un incremento de 3.7 W), mientras que con los canales FACH se requieren 7.95 W independientemente del número de usuarios, con lo cual se ve la ventaja de estos canales. Sin embargo, para pocos usuarios, por ejemplo cuatro usuarios, los canales FACH aún requieren transmitir con 7.95 W, mientras que con canales DCH sólo se requieren 3.8 W (4.15 W menos que con los FACH).

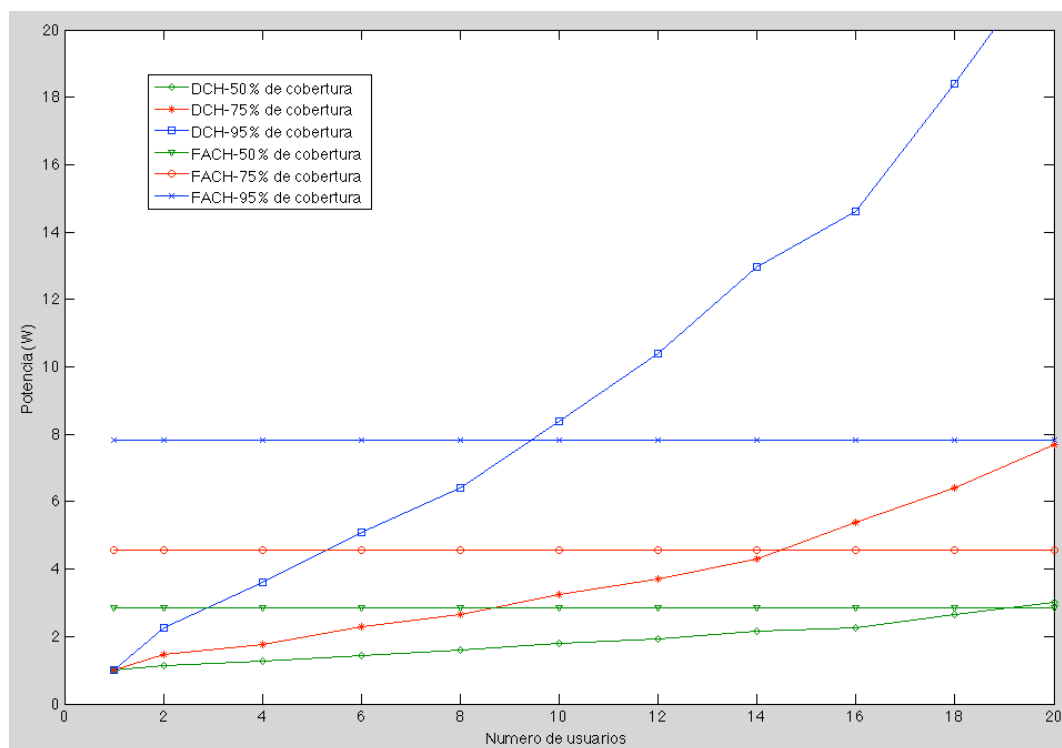


Figura 22. Potencia de estación base vs número de usuarios.

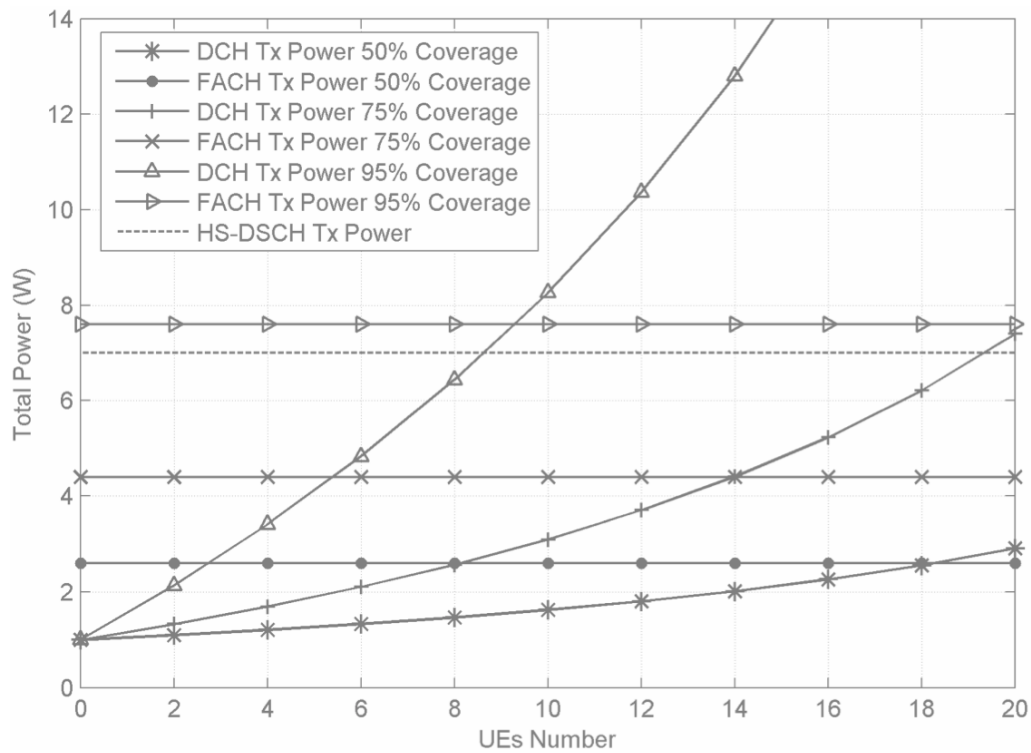


Figura 23. Resultados de [Alexiou, 2007].

Con respecto al punto de conmutación de modo de transmisión (cambiar de transmisión unicast a transmisión multicast), se puede observar en la Figura 22, que para una cobertura de 95% y un número de usuarios mayor a 10, la potencia que requiere el canal de acceso común (curva marcada como FACH-95%) es menor que la potencia requerida por los canales dedicados (curva marcada como DCH-95%), por lo que el punto de conmutación del modo de transmisión se obtiene para este número de usuarios. Es decir, a partir de 10 usuarios, cambiar a transmisión multicast empieza a generar un ahorro de potencia de transmisión en la estación base, el cual se incrementa conforme aumenta el número de usuarios atendidos. Para radios de cobertura de 75% y 50%, los puntos de conmutación son en 15 y 20 usuarios, respectivamente. Estos resultados son muy similares a los presentados en [Alexiou, 2007], los cuales se presentan en la Figura 23 para comparación visual con los resultados de este trabajo.

6.2 Simulación de red MBMS en diferentes ambientes de propagación

Una vez que se obtuvieron los datos de referencia iniciales, se procedió a las simulaciones en diferentes ambientes de propagación de acuerdo a la caracterización del canal radio explicada en el Capítulo 4, utilizando para el canal rural el perfil definido en la Tabla III, para el urbano el de la Tabla IV, y para el urbano denso el de la Tabla V. Los resultados para los tres ambientes se presentan en las tres figuras siguientes.

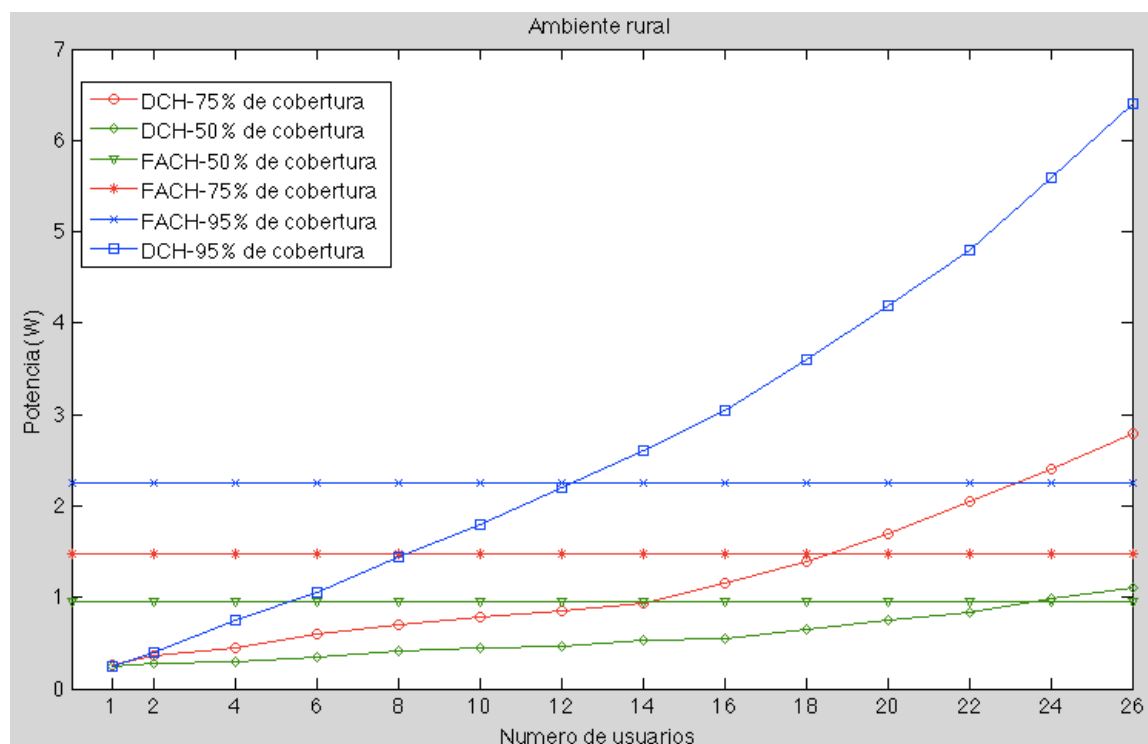


Figura 24. Potencia vs Número de usuarios en ambiente rural.

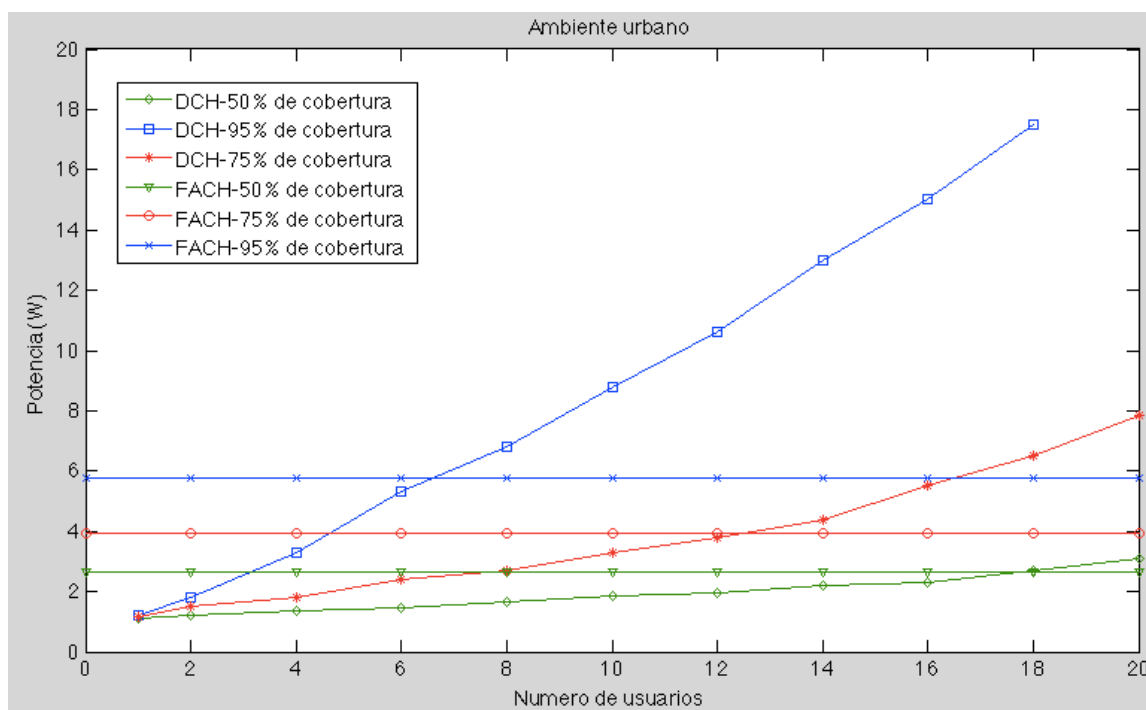


Figura 25. Potencia vs Número de usuarios en ambiente urbano.

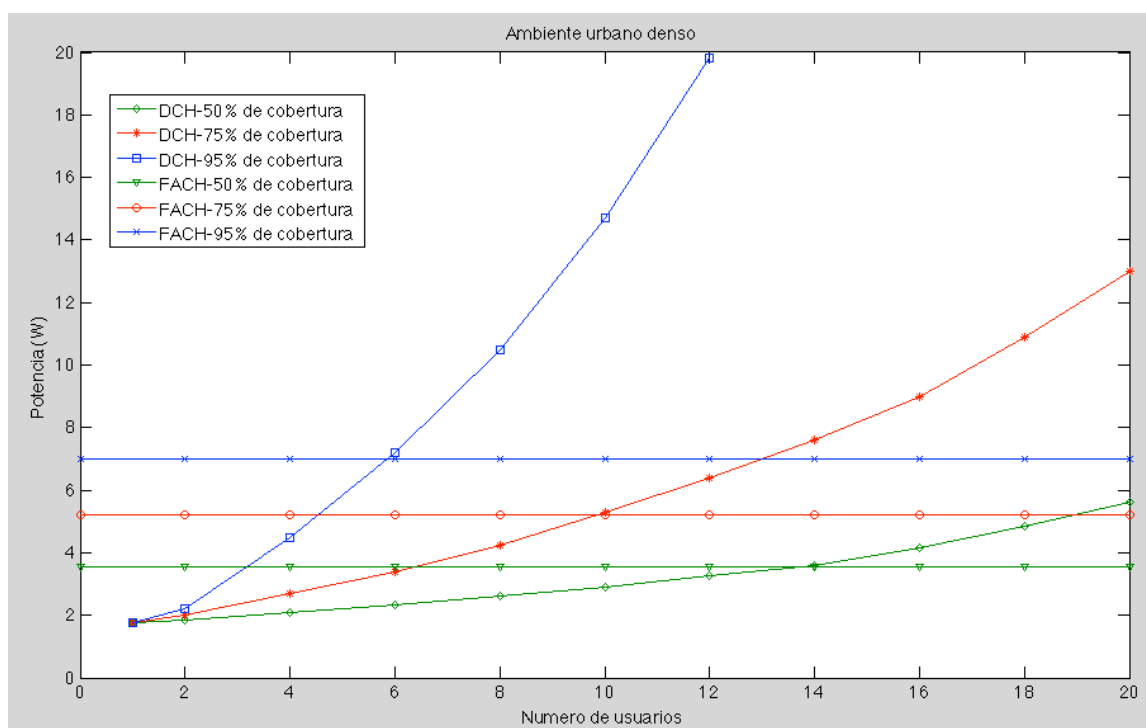


Figura 26. Potencia vs Número de usuarios en ambiente urbano denso.

Como se puede observar, en los ambientes urbano y urbano denso los puntos de conmutación se obtienen a menor número de usuarios, comparados con los valores de referencia iniciales obtenidos sobre un canal Okomura-Hata que no considera multitrayectorias ni desvanecimiento (Figura 22), ya que estos fenómenos degradan la calidad de la señal, por lo que la estación base requiere mayor potencia para obtener el mismo BER del 1%. En la Tabla VII se presenta un resumen de las gráficas anteriores, resaltando el punto de conmutación que se obtiene para los diferentes ambientes de propagación. En la Figura 27 se grafican estos datos junto con los datos de referencia iniciales.

Tabla VII. Puntos de conmutación para diferentes ambientes de propagación.

Ambiente	Porcentaje de cobertura	Punto de conmutación (# de usuarios)
Rural	50	24
Urbano	50	18
Urbano denso	50	14
Rural	75	19
Urbano	75	13
Urbano denso	75	10
Rural	95	13
Urbano	95	7
Urbano denso	95	6

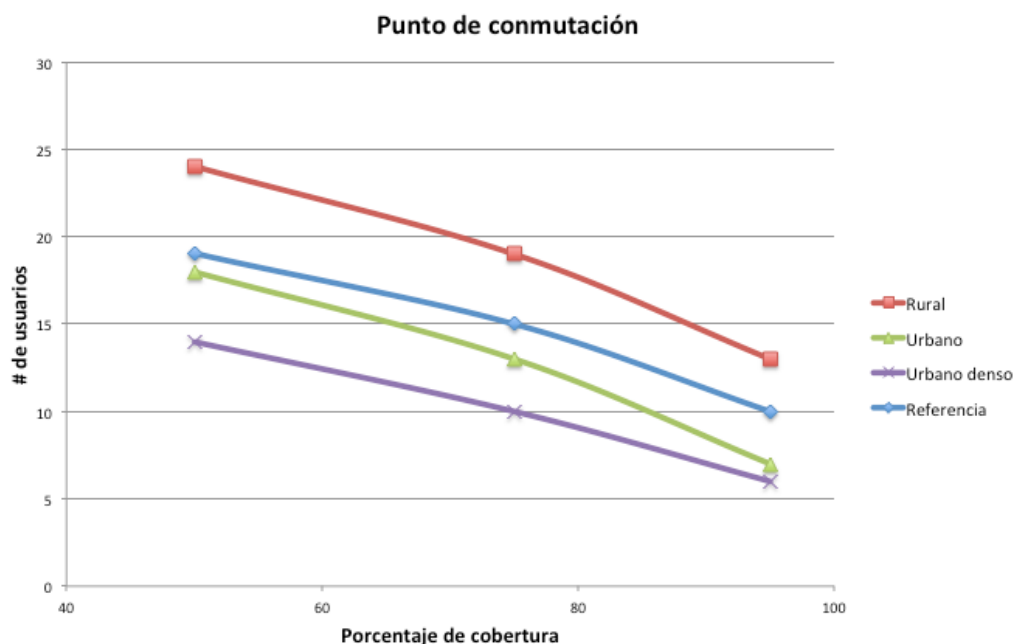


Figura 27. Punto de conmutación para diferentes ambientes de propagación.

Como se observa en la Figura 27, hay una diferencia importante en el número de usuarios en el que se debe hacer la conmutación de modo de transmisión según el tipo de ambiente, ya que en el ambiente rural, para una cobertura del 50%, se requiere hasta que 24 usuarios desean recibir el mismo contenido, mientras que en el ambiente urbano denso el cambio ocurre con tan sólo 14. Esta diferencia se debe a que en un entorno urbano denso se requiere transmitir con mayor potencia para poder superar los obstáculos que presenta para la propagación de la señal para una misma calidad de servicio; entonces, con pocos usuarios se alcanza el umbral para hacer el cambio de modo de transmisión.

Debido a que en un ambiente urbano denso generalmente habrá mas usuarios del servicio, es importante hacer el cambio de forma oportuna ya que además del ahorro de potencia y de ancho de banda (ya que estos usuarios dejan de utilizar los canales dedicados para empezar a utilizar el canal de acceso común) también se reduce la interferencia hacia celdas vecinas (esto último no se midió en la simulación por no ser un objetivo de este trabajo, pero es conocido que a menor número de transmisiones habrá menos interferencia [Klien et al, 1991], [Viterbi et al, 1993]).

6.3 Simulación de red MBSFN en diferentes ambientes de propagación

Los resultados presentados en la subsección anterior consideran que las celdas vecinas no contribuyen a la señal útil recibida dado que su transmisión no está sincronizada. Sin embargo, como se mencionó en el capítulo anterior, se pueden sincronizar para constituir una Red de Frecuencia Única, creándose una MBSFN y aprovechar las ventajas que ofrece. En una MBSFN se pueden presentar tres casos de estudio importantes:

1. El usuario se encuentra a la misma distancia de tres estaciones base (mejor caso, representado en la Figura 28(a)).
2. El usuario se encuentra a la misma distancia de dos estaciones base (representado en la Figura 28(b)).
3. El usuario se encuentra a diferente distancia de las tres estaciones base (caso general).

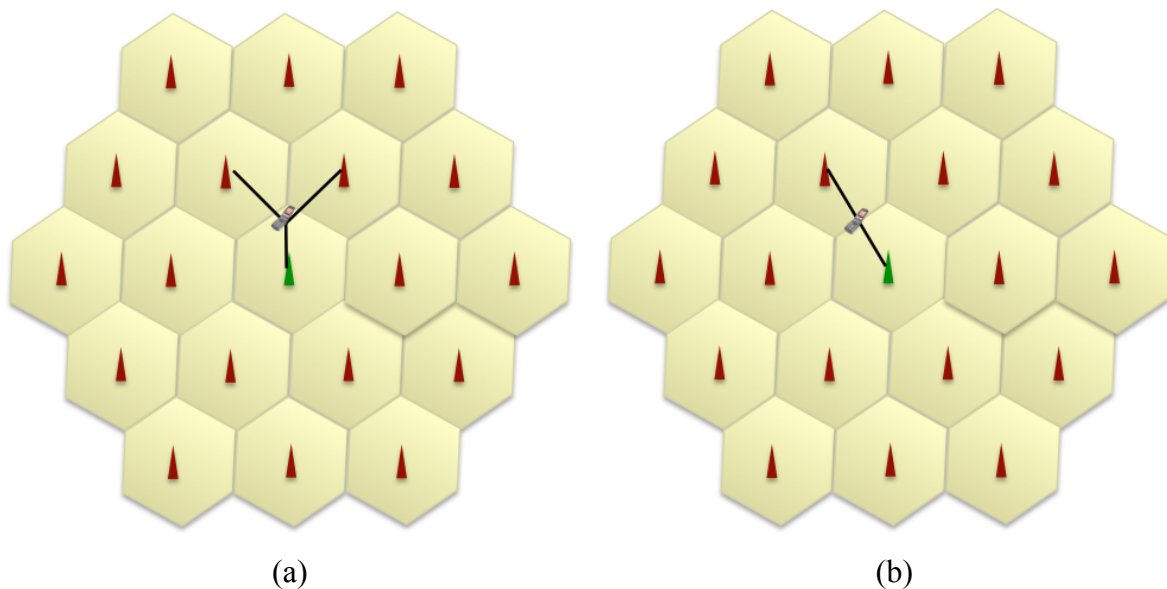


Figura 28. Casos de estudio para una MBSFN.

Para estas simulaciones es importante aclarar que, dado que ahora se está formando una red, la cobertura es del 100%. Los resultados que se obtuvieron se presentan en las figuras siguientes. Se presentan junto con los resultados del escenario anterior (que no era MBSFN) para fines de comparación.

En la Figura 29 se presentan los resultados del ambiente rural. Para el caso general de una MBSFN (caso 3, en el que el usuario se encuentra a diferente distancia de las tres estaciones base) se requiere una potencia de transmisión de 1.28 W para obtener la calidad de señal objetivo (BER=1%). Comparado con el resultado de la sección anterior, específicamente con la Figura 24, en el que el canal de acceso común requiere 2.25 W, con esta configuración se tiene un ahorro del 43%. Para el caso 2, en el que el usuario se encuentra a la misma distancia de dos estaciones base, el ahorro corresponde a un 59% (se requieren 0.92 W). Por último, para el caso 1, en que el usuario se encuentra a la misma distancia de las tres estaciones base (caso ideal y poco probable), al requerirse sólo 0.4 W, el ahorro es de 82%.

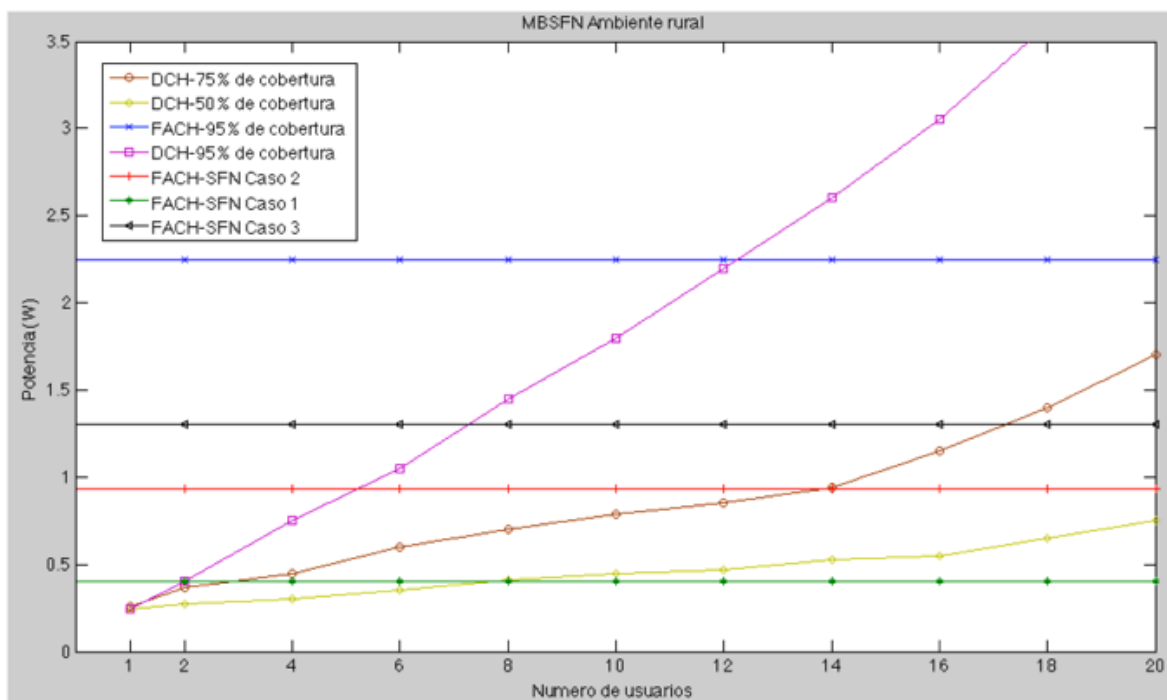


Figura 29. Punto de conmutación de MBSFN en ambiente rural.

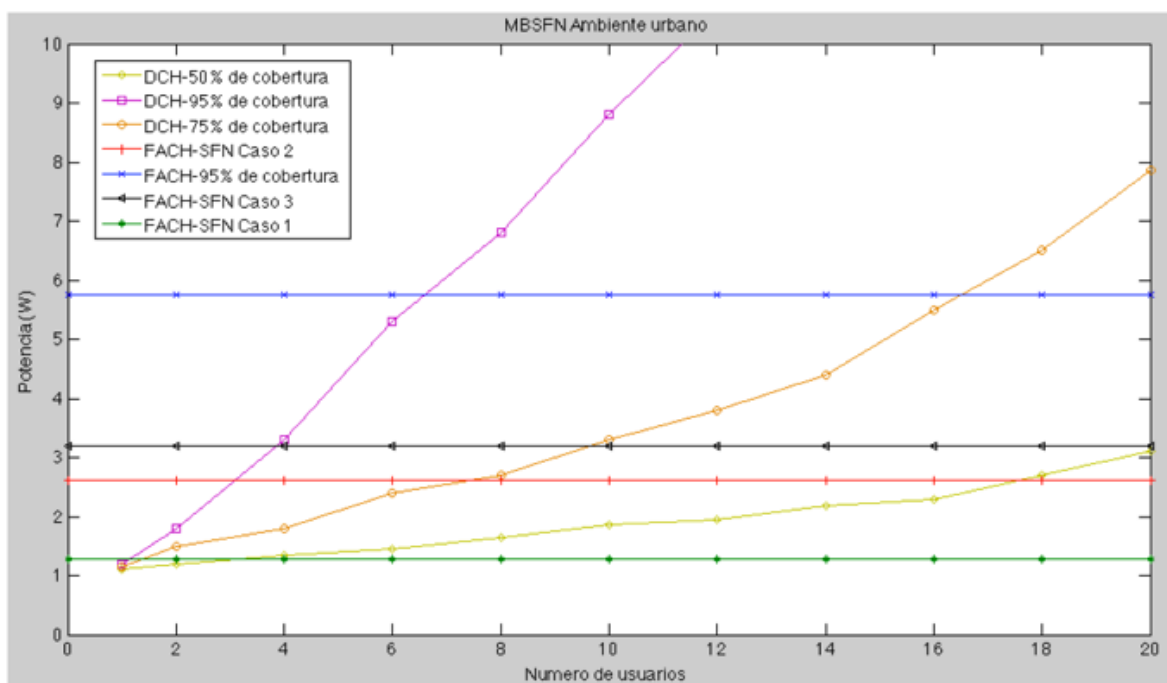


Figura 30. Punto de conmutación de MBSFN en ambiente urbano.

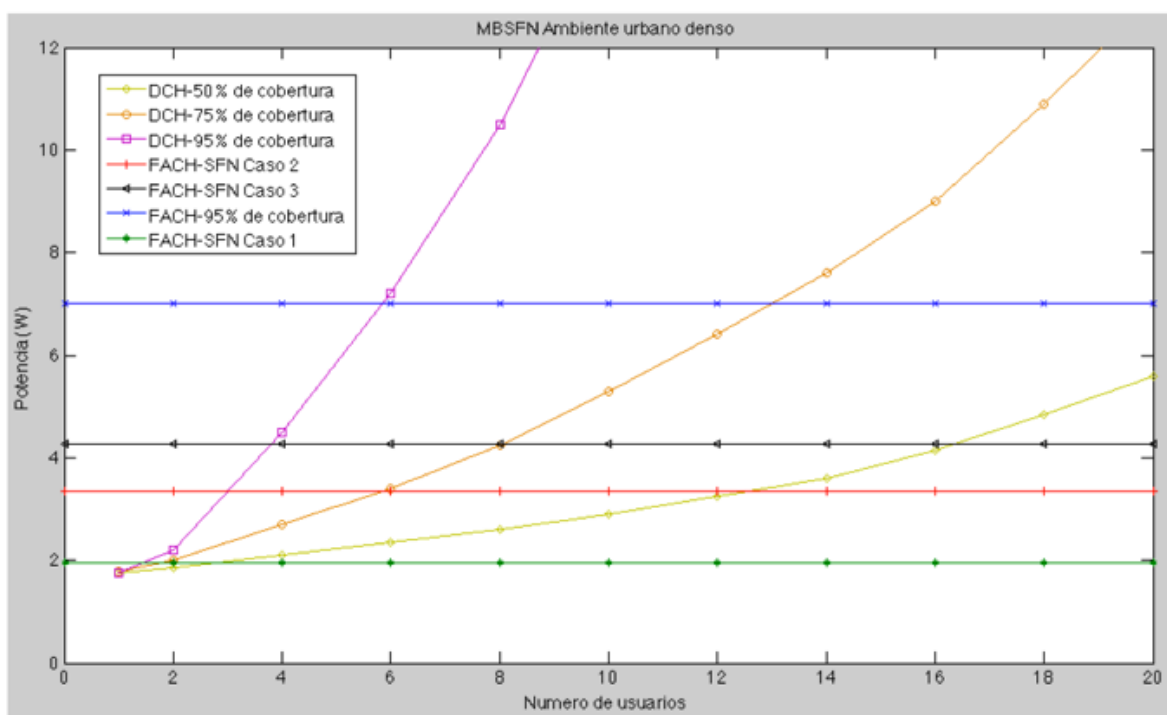


Figura 31. Punto de conmutación de MBSFN en ambiente urbano denso.

Para los ambientes urbano y urbano denso los ahorros son un poco menores, pero aún significativos; estos se presentan en la Tabla VIII. La tabla muestra que al utilizar la configuración de MBSFN las celdas vecinas dejan de ser interferentes y contribuyen a una mejor calidad de la señal, por lo que el punto de conmutación de modo de transmisión se alcanza a menor número de usuarios, lo que a su vez implica una menor potencia de transmisión para alcanzar el objetivo de BER=1%.

Tabla VIII. Puntos de conmutación y ahorro de potencia de MBSFN en diferentes ambientes de propagación.

Ambiente	SFN	Punto de conmutación (# de usuarios)	Ahorro de potencia (W)
Rural	No	13	0.95
	Sí	8	
Urbano	No	7	2.56
	Sí	4	
Urbano denso	No	6	2.73
	Sí	4	

Con estos resultados se comprueban los beneficios de tener una configuración en red de frecuencia única, ya que el cambio de modo de transmisión se puede hacer a un número menor de usuarios y, por lo tanto, desde ese momento se empieza a ahorrar potencia de transmisión y ancho de banda, y se contribuye a reducir la interferencia.

Capítulo 7

Resultados: estándar FLO

En este capítulo se presenta la evaluación del estándar FLO para analizar su cobertura, como parte del proceso de planeación de una red de frecuencia única para la transmisión de video móvil. El análisis se realiza a partir de la tasa de bit erróneo, considerando diferentes configuraciones de red. La primera de ellas consiste en evaluar el alcance máximo de un transmisor, mientras que la segunda y tercera consideran una red SFN de dos y tres transmisores, respectivamente; el cuarto y último escenario de simulación es un caso de uso para la Ciudad de Mexicali.

7.1 Evaluación para un transmisor

En la Figura 32 se muestra el escenario de simulación considerando un transmisor. El modelo de canal representado por H incluye: pérdidas por propagación, multitrayectorias y desvanecimientos (simulados mediante los modelos explicados en el capítulo 4). El punto de medición se ubica en Rx y el transmisor se encuentra en Tx . La distancia entre Rx y Tx es un valor que va cambiando durante la simulación de manera que se obtienen resultados para diferentes distancias. En la Tabla IX se muestran los parámetros de simulación considerados.

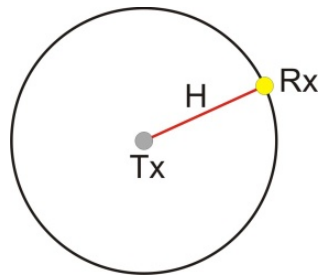


Figura 32. Localización del punto de medición para un solo transmisor

Tabla IX. Parámetros de simulación de un solo transmisor

Parámetro	Valor
Potencia de Transmisión	50 KW
Potencia de ruido	-129 dB
Numero de Transmisores	1
Modos de transmisión de FLO	0, 1, 2, 3, 4
Tasa de Símbolo OFDM	1200 símbolos por segundo
Tasa de codificado Reed-Solomon	RS(16,12)
Ancho de banda	6 MHZ
Tipo de ambiente	Rural, urbano, urbano denso
Frecuencia central	700 MHz
Altura del transmisor	60 mts
Altura del receptor	1.5 mts

Los resultados para los diferentes ambientes de propagación (rural, urbano y urbano denso) se muestran de la Figura 34 a la Figura 36.

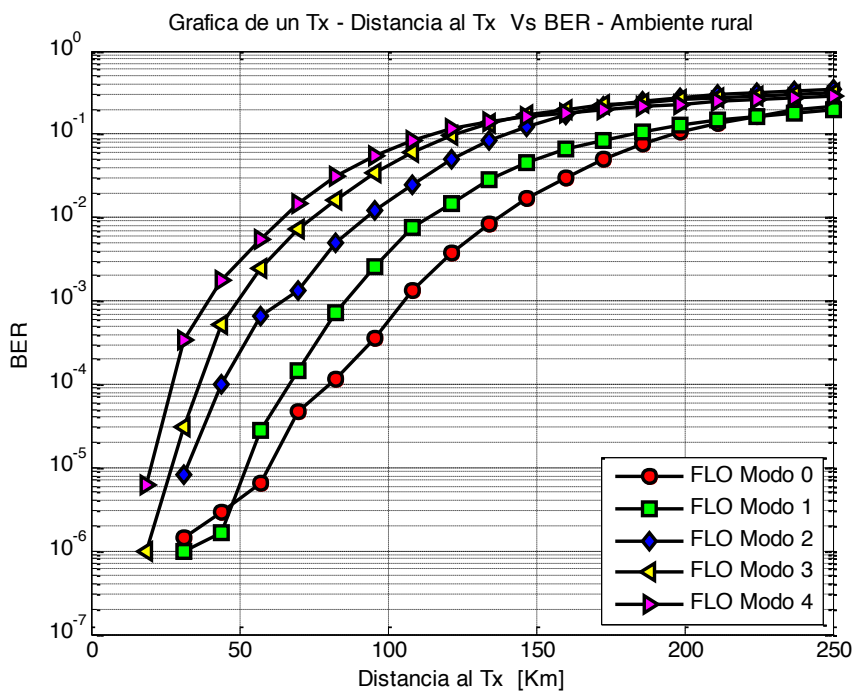


Figura 33. Máximo alcance de un transmisor en ambiente rural.

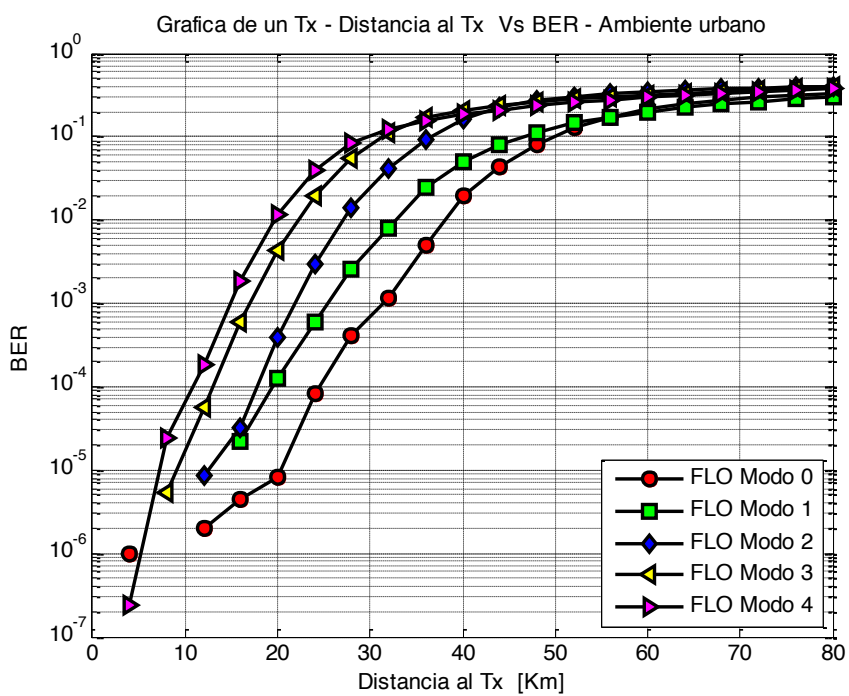


Figura 34 Máximo alcance de un transmisor en ambiente urbano.

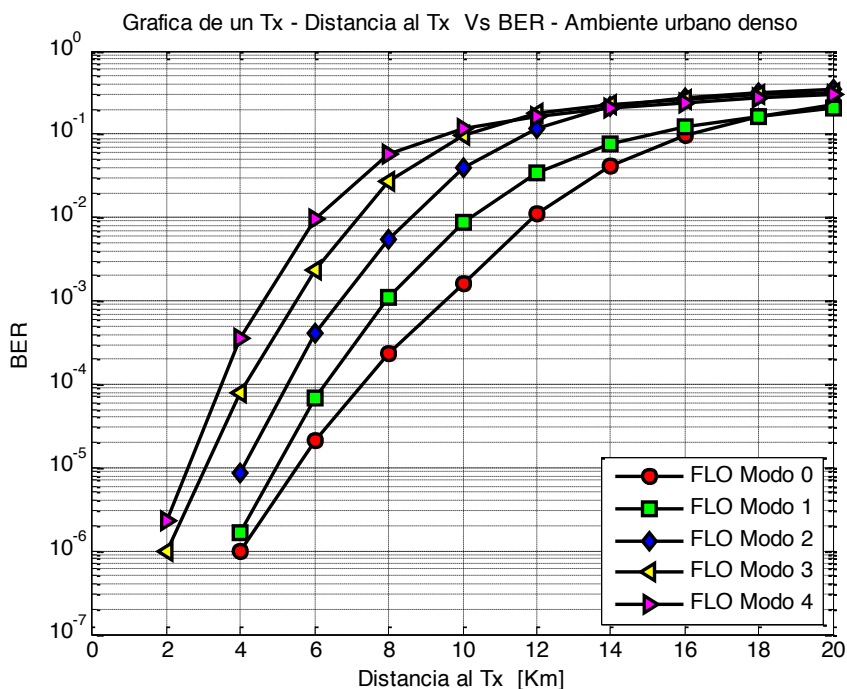


Figura 35 Máximo alcance de un transmisor en ambiente urbano denso.

En las Figuras 33 a 35 se puede observar que el máximo alcance que puede lograr un transmisor para un determinado BER, depende del ambiente en el que la señal se propaga. Dado que un ambiente rural la señal que se transmite no se ve tan afectada por multitrayectorias y desvanecimientos, ésta puede tener mayor cobertura con una buena calidad; por ejemplo, para un BER de 10^{-3} se alcanzan más de 100 Km utilizando el modo 0 de FLO, mientras que en un ambiente urbano denso el alcance es de menos de 10 Km, obteniéndose una relación de aproximadamente 10 a 1. Para el modo 4, que es menos robusto (utiliza modulación más propensa al ruido y menor tasa de corrección de errores) se obtiene una relación similar (aproximadamente 45 Km para el ambiente rural y 4.5 Km para el urbano denso).

Con estos resultados se demuestra que los esquemas de codificación y modulación juegan un papel importante en el máximo alcance que puede lograr el transmisor, recordando que también impactan en la tasa de transmisión de datos, por lo que existe un compromiso entre el área de cobertura y la tasa de transmisión, en el que a mayor tasa de transmisión deseada corresponde menor área de cobertura.

7.2 Evaluación de una red SFN de dos transmisores

La simulación de una red SFN de dos transmisores tiene como objetivo observar los efectos en el área de cobertura al tener la transmisión simultánea de dos señales.

Una red SFN de dos transmisores presenta dos puntos de operación importantes, los cuales se ilustran en la Figura 36. El inciso a es un caso ideal, cuando el receptor se encuentra a la misma distancia de los transmisores, y de aquí en adelante será llamado caso $H_a=H_b$. El inciso b es el caso donde el receptor se encuentra más cerca de uno de los transmisores (en este caso el transmisor a) y será llamado de aquí en adelante como caso $H_a < H_b$. Las distancias H_a y H_b son valores que van cambiando durante la simulación de manera que se obtienen resultados para diferentes distancias. En la Tabla X se muestran los parámetros de operación para la red SFN de dos transmisores.

Como un primer resultado de este escenario de red SFN con dos transmisores, se encontró que el caso $H_a=H_b$ representa el conjunto de puntos (circunferencia) de máxima ganancia, ya que la diferencia en retardo de las dos señales que arriban al receptor es cero, por lo que las señales se suman constructivamente.

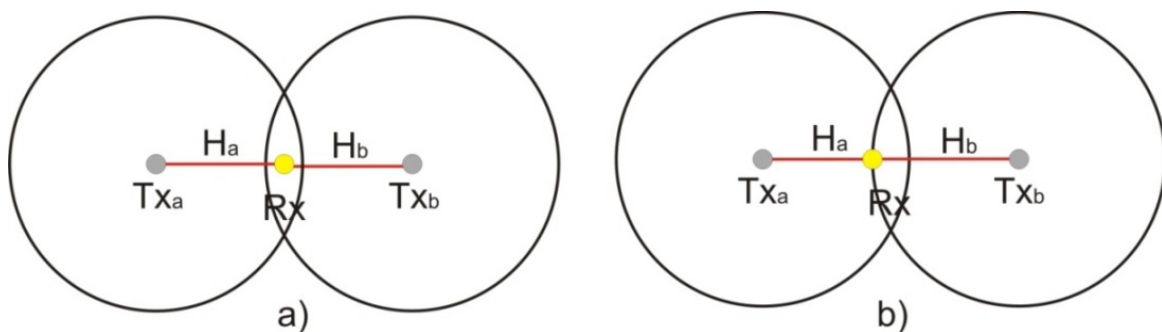


Figura 36. Puntos de operación importantes en una red SFN de dos transmisores.

Tabla X. Parámetros de operación de la SFN de dos transmisores.

Parámetro	Valor
Potencia de Transmisión	50 KW
Potencia de ruido	-129 dB
Numero de Transmisores	2
Modos de transmisión	0, 1, 2, 3, 4
Tasa de Símbolo OFDM	1200 símbolos por segundo
Tasa de codificado Reed-Solomon	RS(16,12)
Ancho de banda	6 MHZ
Tipo de ambiente	Rural, urbano, urbano denso
Frecuencia central	700 MHz
Punto de operación	$T_a < T_b$
Altura del transmisor	60 mts
Altura del receptor	1.5 mts

Para el caso $H_a < H_b$ las señales arriban a Rx con diferente retardo, por lo que existe cierto nivel de interferencia, la cual es constructiva si la diferencia en el retardo es menor que la duración del prefijo cíclico, y es destructiva en el caso contrario. Los resultados para este caso se muestran de la Figura 37 a la Figura 39. Nuevamente, se observa que la distancia máxima entre transmisores que se puede alcanzar depende del tipo de ambiente en el que se propague.

Grafica con dos Tx caso $T_a < T_b$ - Distancia entre transmisores Vs BER - Ambiente rural

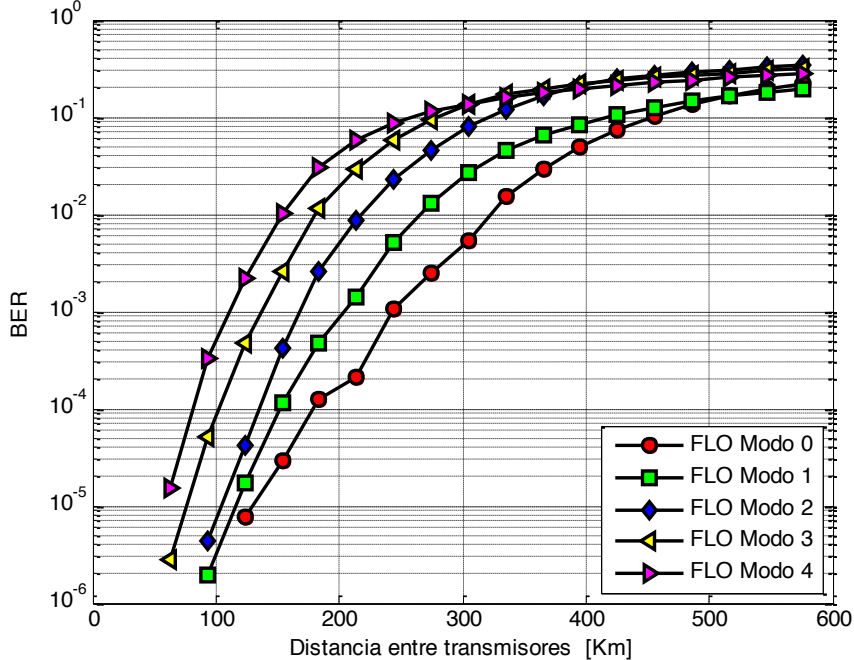


Figura 37. Máxima distancia entre dos transmisores $H_a < H_b$ en ambiente rural.

Grafica con dos Tx caso $T_a < T_b$ - Distancia entre transmisores Vs BER - Ambiente urbano

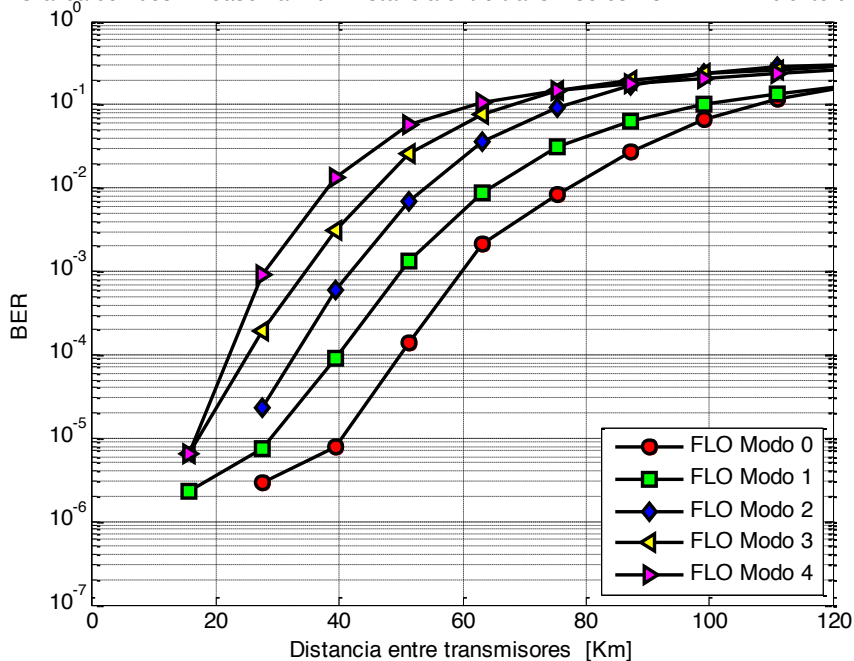


Figura 38. Máxima distancia entre dos transmisores $H_a < H_b$ en ambiente urbano.

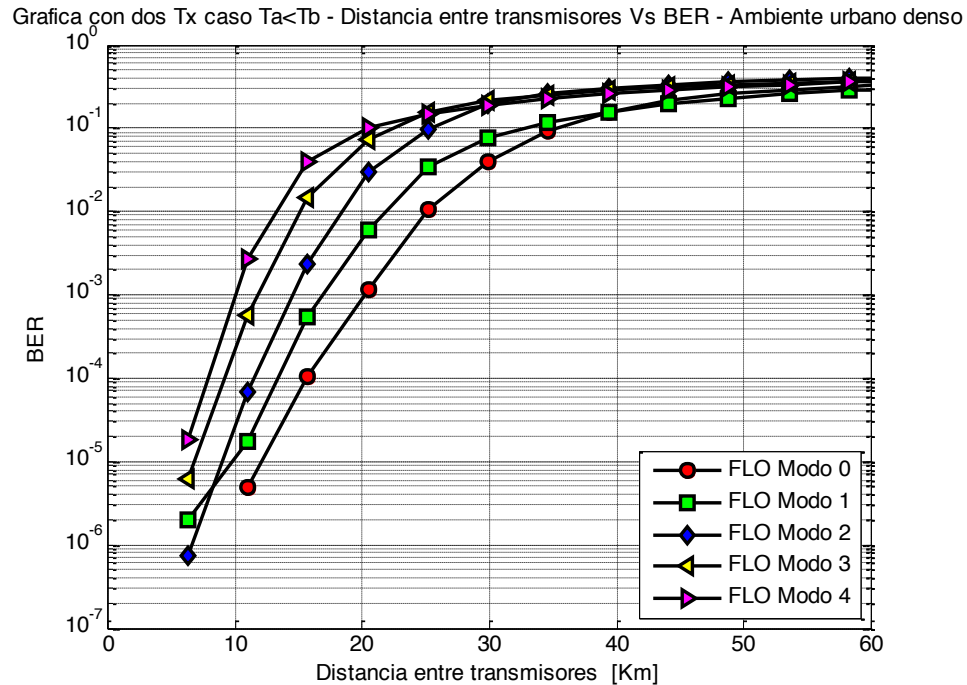


Figura 39. Máxima distancia entre dos transmisores $H_a < H_b$ en ambiente urbano denso.

Nuevamente se observa que, dado que en el ambiente rural la señal transmitida no se ve tan afectada por las perturbaciones del canal, en el caso de dos transmisores permite ubicarlos separados por una distancia grande; en cambio, cuando la señal se propaga en un ambiente urbano o denso, la distancia máxima a la que se pueden colocar los transmisores se reduce significativamente. Por ejemplo, usando el modo 4, para un BER de 10^{-3} , en el ambiente rural los transmisores pueden estar separados más de 100 Km, mientras que en el urbano denso deben estar a menos de 10 Km (relación de 10 a 1 aproximadamente).

7.3 Evaluación de una red SFN con tres transmisores

Una red SFN de tres transmisores presenta tres puntos de operación importantes, los cuales se muestran en la Figura 40.

El punto de operación a), caso ideal referenciado como $H_a = H_b = H_c$, presenta la característica de que las señales de los tres transmisores arriban al mismo tiempo al receptor, este punto es el de máxima ganancia de la red ya que los tres transmisores contribuyen positivamente a la señal recibida.

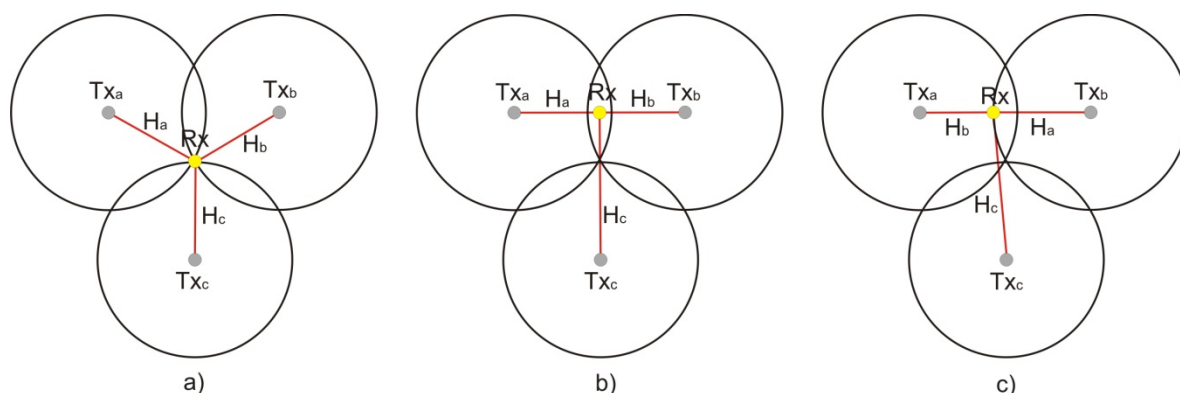


Figura 40. Puntos de operación importantes en una red SFN de tres transmisores.

El punto de operación b), el cual es referenciado como $H_a = H_b < H_c$, presenta la característica de que las señales de dos transmisores arriban al mismo tiempo, mientras que la señal del tercer transmisor arriba posteriormente. Este punto de operación presenta una ligera ganancia, pero el tercer transmisor puede convertirse en interferente si el retardo es lo suficientemente grande para exceder el prefijo cíclico.

Por último, en el punto de operación c) las señales de los tres transmisores arriban en tiempos diferentes. Si la distancia entre transmisores es demasiado grande la diferencia en el retardo de arribo al receptor puede exceder el prefijo cíclico, y en ese caso los transmisores se convierten en interferentes.

En las simulaciones, las distancias H_a , H_b y H_c son valores que van cambiando de manera que se obtienen resultados para diferentes distancias. En la Tabla XI se muestran los parámetros de operación para la red SFN de tres transmisores.

Tabla XI. Parámetros de operación de la SFN de tres transmisores.

Parámetro	Valor
Potencia de Transmisión	50 KW
Potencia de ruido	-129 dB
Numero de Transmisores	3
Modos de transmisión	0, 1, 2, 3, 4
Tasa de Símbolo OFDM	1200 símbolos por segundo
Tasa de codificado Reed-Solomon	RS(16,12)
Ancho de banda	6 MHZ
Tipo de ambiente	Rural, urbano, urbano denso
Frecuencia central	700 MHz
Punto de operación	$T_a < T_b < T_c$
Altura del transmisor	60 mts
Altura del receptor	1.5 mts

Dado que el caso en que $H_a < H_b < H_c$ es el caso general, de la Figura 41 a la Figura 43 se presentan los resultados para los ambientes rural, urbano y urbano denso, respectivamente.

Grafica con tres Tx caso $T_a < T_b < T_c$ - Distancia entre transmisores Vs BER - Ambiente rural

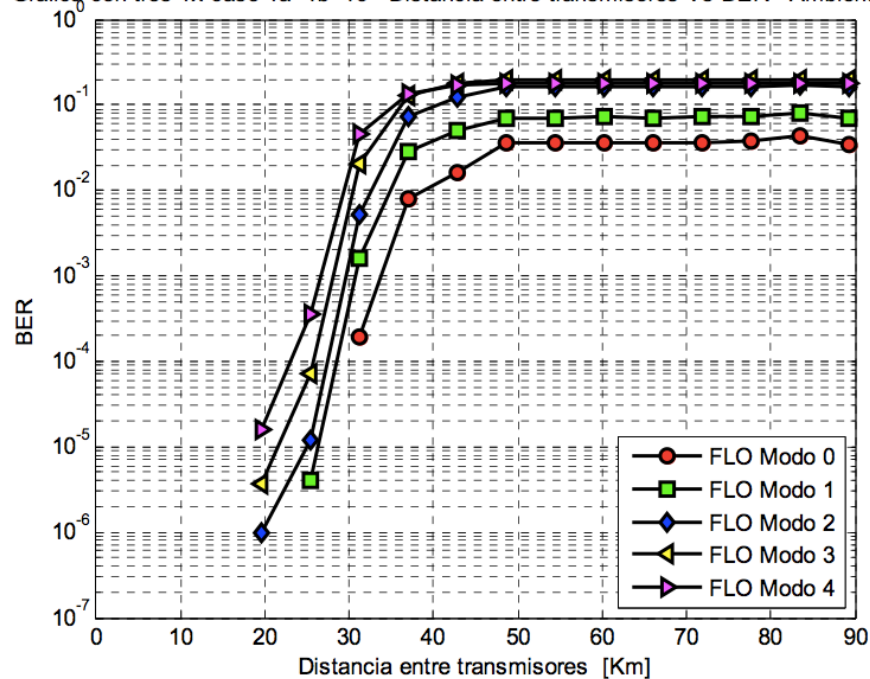


Figura 41. Máxima distancia entre tres transmisores $H_a < H_b < H_c$ en ambiente rural.

Grafica con tres Tx caso $T_a < T_b < T_c$ - Distancia entre transmisores Vs BER - Ambiente urbano

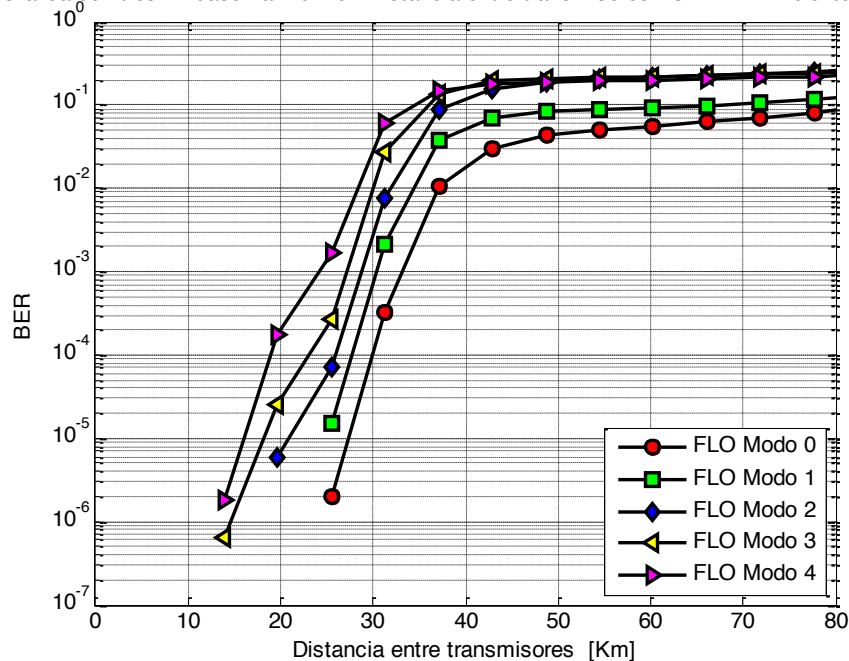


Figura 42. Máxima distancia entre tres transmisores $H_a < H_b < H_c$ en ambiente urbano.

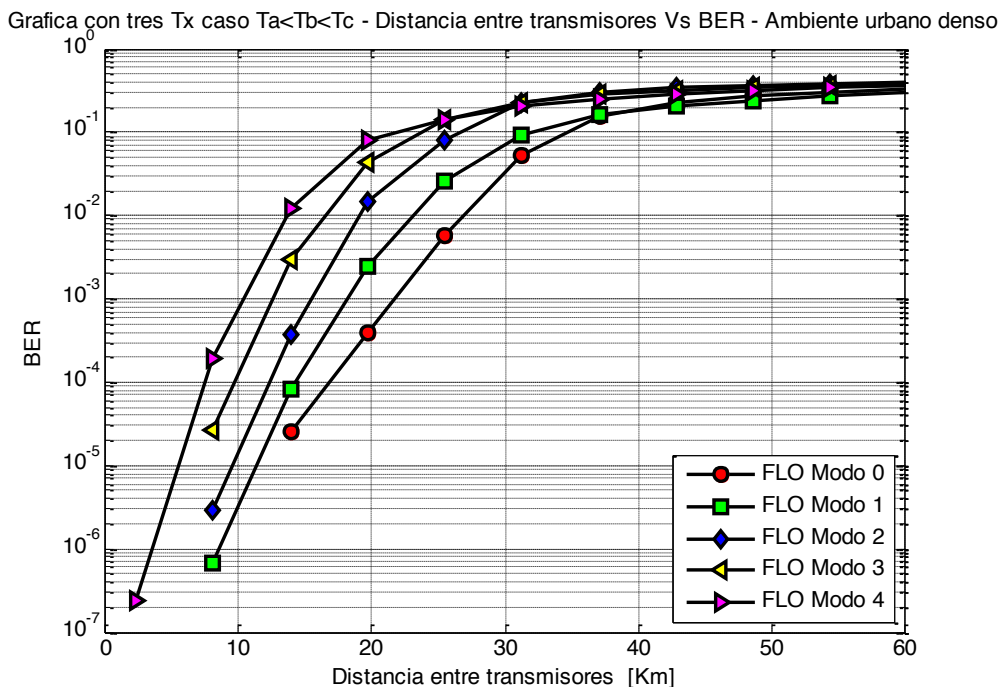


Figura 43. Máxima distancia entre tres transmisores $H_a < H_b < H_c$ en ambiente urbano denso.

Además de lo señalado para los anteriores escenarios en cuanto al compromiso entre área de cobertura y velocidad de transmisión, en estas gráficas se resalta el efecto de la interferencia de los transmisores que se encuentran suficientemente alejados del receptor, de manera que su señal arriba después de terminar el tiempo del prefijo cíclico (que permite recibir señales y aún considerarlas como útiles). Por consiguiente, este caso es un punto de medición más apegado a la realidad, ya que dentro de una red de frecuencia única cualquier transmisor se puede convertir en interferente si el receptor se encuentra lo suficientemente alejado de forma que se excede el prefijo cíclico. Aquí cabe destacar que la relación de la máxima distancia entre transmisores para el ambiente rural (Figura 41) y urbano denso (Figura 43) ya no es 10 a 1 como en los casos anteriores (uno y dos transmisores); ya que por ejemplo, para un BER de 10^{-3} , en el modo 4 la separación entre transmisores para el ambiente rural es de 27 Km, y para el urbano denso es de poco más de 10 Km (relación de 2.5 a 1 aproximadamente). La disminución en la distancia entre transmisores en el ambiente rural se debe a que los transmisores empiezan a ser interferentes, de ahí que se concluye que en este tipo de ambiente no es recomendable ubicar muchos transmisores.

7.4 Quinto escenario: simulación de caso de uso

El objetivo de este escenario de simulación es analizar el área de cobertura de una red de video móvil con dos transmisores, los cuales deben proporcionar cobertura al área urbana de Mexicali, el área rural de su valle y a la ciudad de San Luis Rio Colorado. La frecuencia central se situó a 669.25 MHz, ya que corresponde al canal 47, asignado para Mexicali de acuerdo a la asignación de frecuencias para la transmisión de televisión digital de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes [SCT, 2006]. Para este escenario se creó una rejilla de prueba de 1600 puntos, representando un área de 90 Km x 70 Km; el receptor se colocó en cada uno de los puntos de esta rejilla y se tomaron las mediciones correspondientes a cada uno de ellos, de manera que los resultados de calidad de la señal recibida (representada por el BER) se presentan con curvas de nivel en los mapas de las Figura 44 a Figura 48. Las consideraciones de simulación se muestran en la Tabla XII. Los transmisores utilizan diferente potencia; después de varias simulaciones se encontró que la combinación de 50 KW para el transmisor del área urbana y 1.5 KW para el del área rural resultaba adecuada para lograr una cobertura de la zona.

Tabla XII. Parámetros de operación de la SFN de dos transmisores en el valle de Mexicali.

Parámetro	Valor
Potencia de ruido	-129 dB
Número de Transmisores	2 (área urbana, 50KW; área rural, 1.5KW)
Modos de transmisión	0, 1, 2, 3, 4
Tasa de Símbolo OFDM	1200 símbolos por segundo
Tasa de codificado Reed-Solomon	RS(16,12)
Ancho de banda	6 MHZ
Tipos de ambiente	Urbano y Rural
Frecuencia central	669.25 MHz
Tamaño área evaluación	90 Km x 70 Km (1600 puntos)
Altura del transmisor	40 mts
Altura del receptor	1.5 mts

Los resultados que se muestran de la Figura 44 a la Figura 48 corresponden a cada uno de los modos de operación del estándar FLO estudiados. Los puntos amarillos en el mapa representan la ubicación de los transmisores, mientras que las curvas de nivel representan la tasa de bit erróneo, para analizar la calidad esperada de video en esta zona geográfica.

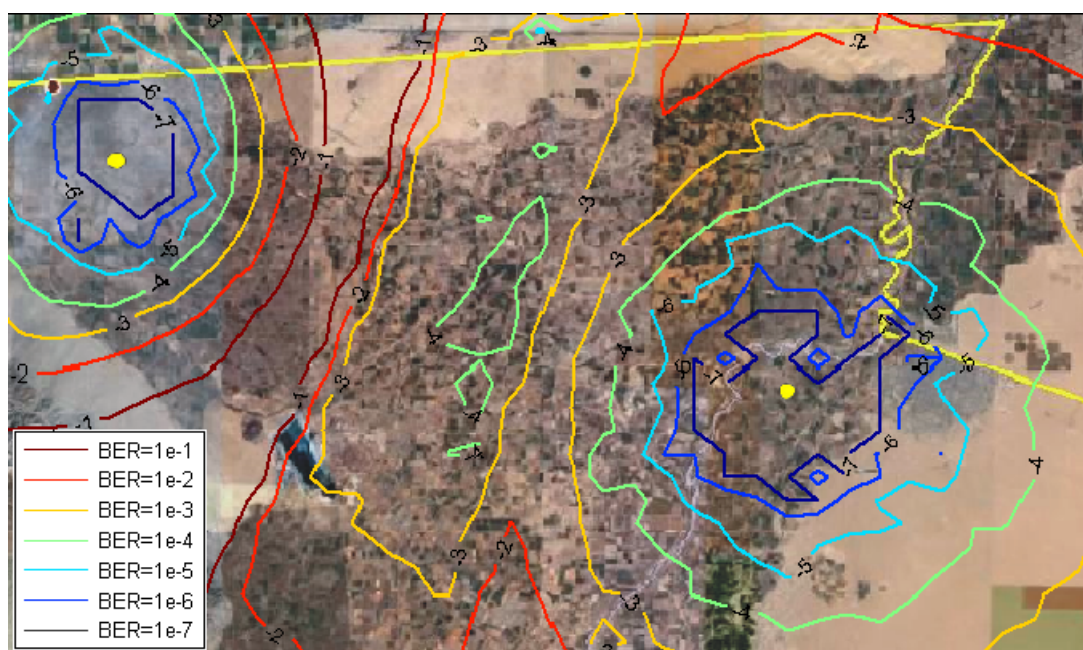


Figura 44. Análisis de cobertura de FLO en modo 0 para dos transmisores en diferente ambiente.

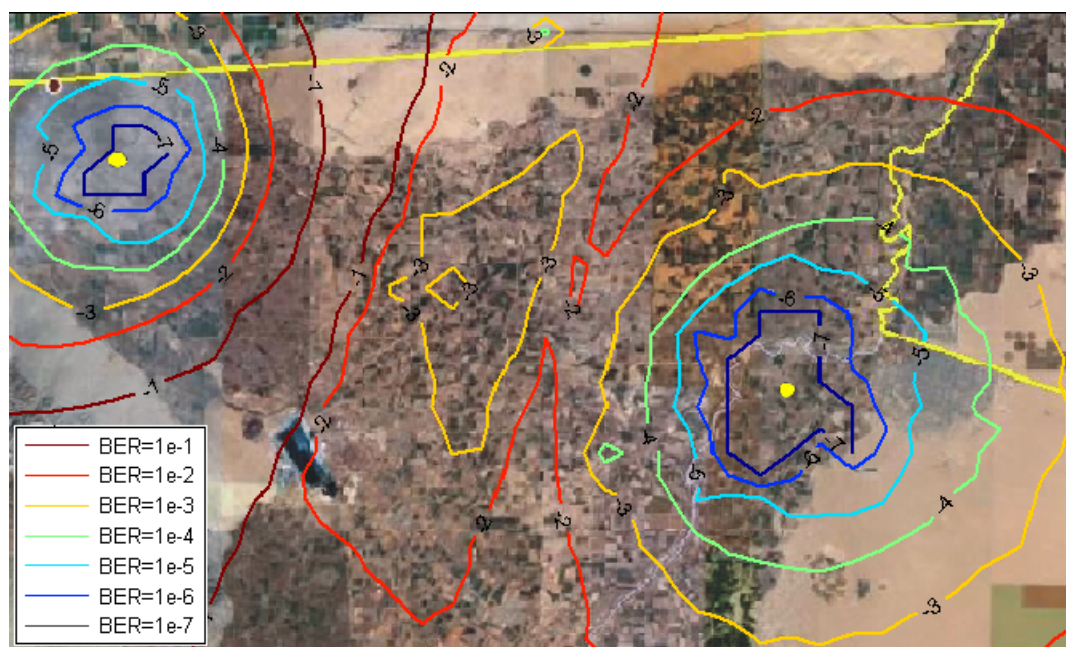


Figura 45. Análisis de cobertura de FLO en modo 1 para dos transmisores en diferente ambiente.

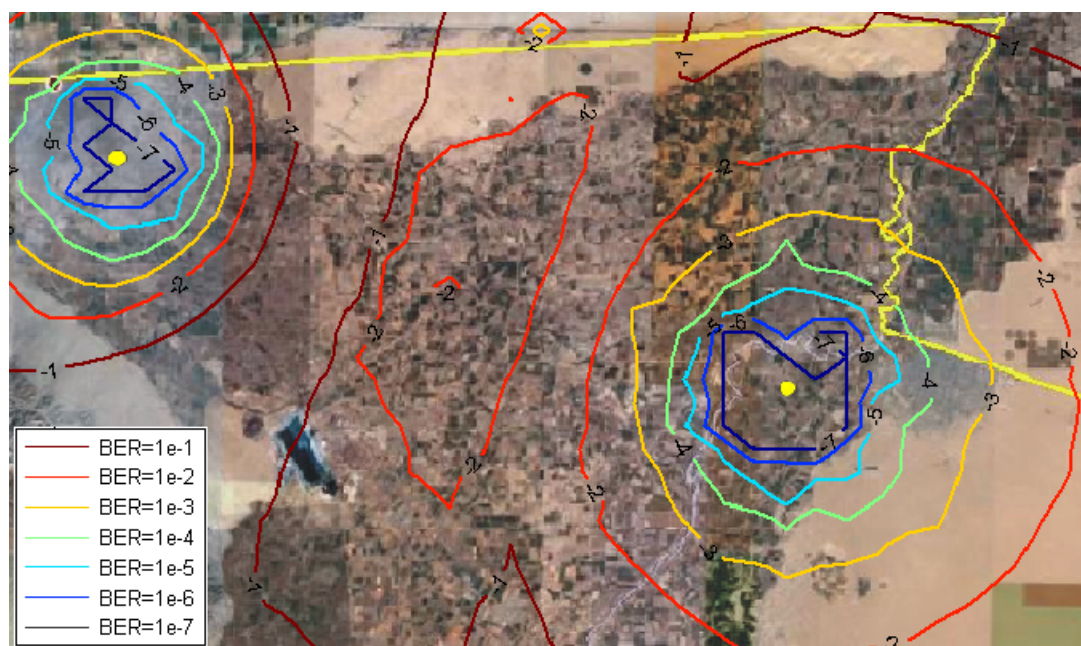


Figura 46. Análisis de cobertura de FLO en modo 2 para dos transmisores en diferente ambiente.

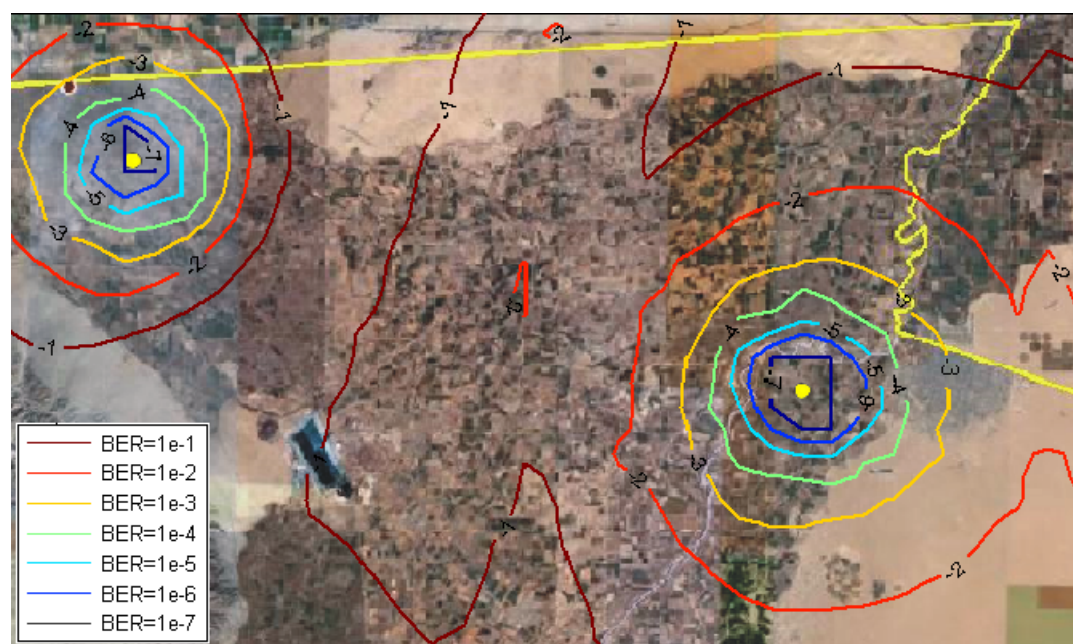


Figura 47. Análisis de cobertura de FLO en modo 3 para dos transmisores en diferente ambiente.

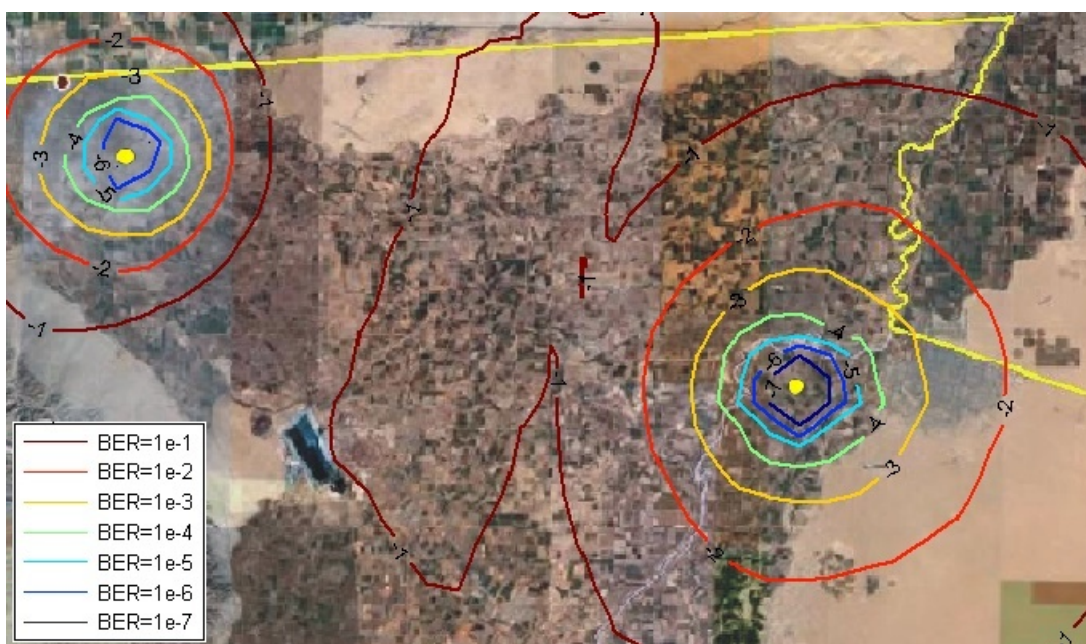


Figura 48. Análisis de cobertura de FLO en modo 4 para dos transmisores en diferente ambiente.

Estas gráficas proporcionan un indicativo visual de la cobertura de la red al operar en diferentes modos de transmisión (que implica diferente modulación, diferente codificación de error, diferente velocidad de transmisión). Se observa que al aumentar el modo de transmisión, lo cual implica aumentar la velocidad de transmisión, disminuye el área que se puede cubrir con la misma calidad de señal. Para cuantificar el impacto sobre el área de cobertura del cambio del modo de operación, se analizó cuáles de los puntos en la gráfica cumplen con un BER menor a 10^{-3} y como referencia de área de cobertura máxima se tomó la del modo 0. Los resultados se muestran en la Tabla XIII. Se observa que para el modo 1 se tiene una disminución del 38% (100-62) con respecto al modo 0, y así sucesivamente con los demás modos de operación. Cabe mencionar que aunque estos resultados son únicamente válidos para este caso, el diseño de la arquitectura de simulación permite realizar cambios para analizar otros diseños de red, por ejemplo, agregando más transmisores, cambiando su ubicación o potencia de transmisión, o bien el área de evaluación.

También es importante observar el efecto de ganancia de red de las SFN, por ejemplo, en la Figura 44 (modo 0 de FLO) hay un área dentro de una curva amarilla en la

cual se obtiene un BER de 10^{-3} debido a la suma de señales de los dos transmisores. Esta área no estaría presente si las señales de los dos transmisores no fueran idénticas y no estuvieran sincronizadas.

Tabla XIII. Porcentaje de cobertura de los modos evaluados respecto al modo 0.

Modo de operación	Área cobertura aproximada	% cobertura respecto al modo 0	BER
Modo 0 (2.8 Mbps)	2,394.0 Km ²	100	10^{-3}
Modo 1 (4.2 Mbps)	1,476.6 Km ²	62	10^{-3}
Modo 2 (5.6 Mbps)	819.0 Km ²	34	10^{-3}
Modo 3 (8.4 Mbps)	492.2 Km ²	21	10^{-3}
Modo 4 (11.2 Mbps)	338.6 Km ²	14	10^{-3}

Capítulo 8

Conclusiones

En este capítulo se presenta un resumen de este trabajo de investigación, se presentan las conclusiones y aportaciones más importantes del mismo, y algunas líneas de trabajo futuro.

8.1 Resumen

Es un hecho que el video móvil es una aplicación con una demanda creciente. Por ejemplo, la BBC señala que durante las Olimpiadas de Londres 2012, su plataforma de video tuvo 106 millones de peticiones desde dispositivos móviles, triplicando anteriores eventos (32 millones durante Beijing 2008 y 38 millones durante la Copa del Mundo 2010) [BBC, 2012]. El reporte no especifica que tipo de red utilizaron esos dispositivos móviles para acceder el contenido, pero seguramente también fue a través de redes celulares. De esos 106 millones de peticiones, 62 millones fueron para eventos en vivo, que se pudieron haber transmitido con mayor eficiencia espectral si se hubiese utilizado una red con capacidades de broadcast/multicast. De ahí la importancia de contar con este tipo de redes.

En este trabajo se estudiaron dos tipos de redes con capacidades de transmisión en broadcast/multicast: las redes 3G/4G que incorporan el estándar MBMS, y la red dedicada de video móvil FLO. Se estudió también su funcionamiento bajo el esquema de Red de Frecuencia Única, que permite explotar características adicionales, principalmente la de obtener una ganancia por interferencia constructiva.

En el caso de las redes 3G/4G con MBMS se determinó el punto de conmutación del modo de transmisión unicast al modo de transmisión multicast/broadcast, según el tipo de ambiente de propagación en que se transmite. Esto se obtuvo a través de simulación, tomando en cuenta las perturbaciones presentes en el canal radio: pérdidas por propagación, multitrayectorias y desvanecimientos.

Para la red de video móvil FLO se determinó su área de cobertura, también en diferentes ambientes de propagación; y se ejemplificó la utilidad del modelo de simulación desarrollado con un caso de uso para la Ciudad de Mexicali.

8.2 Conclusiones

De acuerdo a los resultados obtenidos se concluye que:

- Es posible lograr un ahorro de potencia de transmisión y de ancho de banda al utilizar redes de comunicaciones móviles con capacidad para transmisión en broadcast/multicast.
- El valor del punto de conmutación de modo de transmisión, que permite el ahorro de potencia y ancho de banda en una red MBMS, depende directamente del ambiente de propagación en que se implemente.
- La configuración en Red de Frecuencia Única con MBMS (MBSFN), disminuye el valor del punto de conmutación del modo de transmisión, obteniendo ahorro en ancho de banda y potencia de transmisión, adicionales a los obtenidos por el simple hecho de usar transmisión multicast.
- El área de cobertura de una red FLO depende directamente del entorno de propagación, de la distancia entre las estaciones base y de la interferencia que se genera entre ellas.
- En una red FLO, la interferencia constructiva de señales provenientes de diferentes estaciones base permite lograr mayor cobertura utilizando menos potencia de transmisión.

8.3 Aportaciones

Las principales aportaciones de este trabajo de tesis son:

- Se determinaron los valores de los puntos de conmutación de modo de transmisión para redes 3G/4G habilitadas con multicast, ya sea en esquema de celdas independientes o en configuración de Red de Frecuencia Única, para tres ambientes de propagación inalámbrica: rural, urbano y urbano denso.
- Se determinaron las áreas de cobertura de la red de video móvil FLO en esquema de Red de Frecuencia Única, para los ambientes de propagación inalámbrica rural, urbano y urbano denso.
- Se desarrolló una arquitectura de simulación y herramienta computacional que se puede adaptar para el análisis de diferentes estándares de video móvil, la cual incorpora las principales afectaciones del canal inalámbrico, como son las pérdidas por propagación, el desvanecimiento de la señal y la interferencia por multitrayectorias.

8.4 Trabajo futuro

En este trabajo se consideró que la potencia de transmisión de un canal de acceso común (FACH) es la necesaria para lograr la cobertura total de la celda. Sin embargo, es posible que el usuario más alejado de la estación base no se encuentre en los límites de la cobertura de la celda, por lo que una estrategia que podría ahorrar más energía es que la potencia del canal de acceso común se adecúe al valor requerido por el usuario más alejado.

En los últimos años han surgido nuevos estándares para transmisión de video móvil, tales como el estándar DVB-H en Europa, y el ATSC-M/H en Estados Unidos. Estos estándares son factibles de utilizarse en México, por lo que sería interesante analizar su ahorro de potencia de transmisión y compararlo con el que se obtiene con FLO.

Bibliografía

- ♦ 3G Americas. Enterprise applications – Key considerations for selecting and deploying wireless corporate applications. 2005.
- ♦ 3GPP TS 23.246. Multimedia Broadcast/Multicast Service (MBMS); Architecture and functional description. 2004.
- ♦ 3GPP TS 36.211. LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation (version 8.3.0 Release 8). 2008.
- ♦ 3GPP R1-071049. Spectral efficiency comparison of possible MBMS transmission schemes: Additional results. 2007.
- ♦ 3GPP2. cdma2000 High Rate Packet Data Air Interface Specification C.S0024-A Version 1.0. 2004
- ♦ Alexiou, A., C. Bouras, V. Kokkinos, E. Rekkas. Evaluation of the multicast mode of MBMS. 18th Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'07). 2007.
- ♦ Alexiou, A., C. Bouras, V. Kokkinos, G. Tsihrizis. Performance Evaluation of LTE for MBSFN Transmissions. Wireless Networks, volume 18, issue 3. Springer. 2012.
- ♦ Arthur, R., Iano Y., Carvalho S.R.M. y Larico R.F. Planificación de la expansión del servicio de retransmisión de TV digital en Brasil usando redes SFN. IEEE Latin America Transaction.. 2007.
- ♦ BBC. BBC Sport breaks online records with first truly digital Olympics [<http://www.bbc.co.uk/mediacentre/latestnews/2012/sport-online-figures.html>]. Consultado el 19 de septiembre de 2012.
- ♦ Blaunstein, Nathan. Radio Propagation in Celular Networks. Artech House. 1999.
- ♦ Chari, R. M., F. Ling, Mantravadi A, K., Vijayan R., Walker G. K. y Chandhok R. FLO Physical Layer: An Overview. IEEE Transactions on Broadcasting. 2007.

- ♦ Clarke, R. H. "A statistical theory of mobile-radio reception," Bell Syst. Tech. J., pp. 957–1000, Jul.–Aug. 1968.
- ♦ Dans, Enrique. El imparable éxito del video. PC Actual. Marzo. 2007.
- ♦ eMarketer. Mobile Content: Games, Music and Video Take to the Cloud. 2010.
- ♦ Falli, M. "Digital land mobile radio communications COST 207", Publications Office European Communities. 1989.
- ♦ Gilhousen K. S., I. M. Jacobs, R. Padovani, A. J. Viterbi, L. A. Weaver Jr, C. E. Wheatley III, "On the Capacity of a Cellular CDMA System", IEEE Transactions on Vehicular Technology, v 40, n 2, May 1991.
- ♦ Gómez Barquero, D., Salieta A., Garcia A.P., Moserrat J.F. y Cardona N. Planificación de una red DVB-H en la ciudad de Valencia. Universidad Politécnica de Valencia. 2007.
- ♦ Hata, M. Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services. IEEE Transactions on Vehicular Technology. 1980.
- ♦ Kaul, Aditya. Mobile TV: Watch it grow. Juniper Research. 2006.
- ♦ Konrad, M. G., Gerstacker, W. H. y Koch, W. Robust MBSFN transmission using the Golden code. Ultra Modern Telecommunications & Workshops, 2009. ICUMT '09. 2009.
- ♦ Laine, Philippe y Herbert Mittermayr. From 3G mobile TV to unlimited mobile TV. Alcatel Telecommunications Review. 2006.
- ♦ Malmgren, G. Pulse shaping in OFDM based single frequency networks, Wireless Personal Communications: An International Journal. 1999.
- ♦ Matolak, David. Worse-than-Rayleigh Fading: Experimental Results and Theoretical Models. IEEE Communications Magazine. 2011.
- ♦ Pätzold, Matthias. Mobile fading channels. John Wiley & Sons. 2002.

- ♦ Pop, M. F. y N. C. Beaulieu, “Limitations of sum-of-sinusoids fading channel simulators,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 49, pp. 699–708, Apr. 2001.
- ♦ Prasad, R. *OFDM for Wireless Communications Systems*, Artech House. Boston. 2004.
- ♦ Qualcomm. FLO technology overview. 2007.
- ♦ Rong, L., O. Ben y Elayoubi, S. Analytical analysis of the coverage of a MBSFN OFDMA network. *Proceedings of IEEE global communications conference (IEEE GLOBECOM 2008)*. 2008.
- ♦ Sälzer, Thomas. MBMS support in E-UTRAN. 3GPP-DVB Workshop. Kansas City, USA. 2011.
- ♦ SCT - Secretaría de Comunicaciones y Transportes–México. *Tabla de Canales Adicionales para la Transición a la Televisión Digital Terrestre*. 2006.
- ♦ Soares, A., Correia, A., Silva, J., y Souto, N. UE Counting Mechanism for MBMS Considering PTM Macro Diversity Combining Support in UMTS Networks. *9th International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications*. Manaus, Brazil. 2006.
- ♦ Stüber, Gordon. *Principles of mobile communication*. Springer. 2001.
- ♦ TIA (Telecommunications Industry Association). *Forward Link Only Air Interface Specification for Terrestrial Mobile Multimedia Multicast*. TIA-1099. 2006.
- ♦ Viterbi A. M., A. J. Viterbi, “Erlang capacity of a power controlled CDMA system”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, v 11, n 6, Aug 1993.
- ♦ Zheng, Y y C. Xiao. *Simulation Models With Correct Statistical Properties For Rayleigh Fading Channels*. *IEEE Transactions On Communications*. 2003.