

**Centro de Investigación Científica y de  
Educación Superior de Ensenada**



**ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DE OFDM COMO MEDIO DE TRANSPORTE EN REDES  
SFN PARA TRANSMISIÓN EN BROADCAST DE VIDEO MÓVIL**

**TESIS**

**MAESTRÍA EN CIENCIAS**

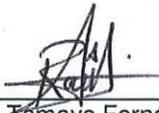
**VIRIDIANA GÓMEZ BARRÓN**

**Ensenada, Baja California, México, septiembre del 2008**

TESIS DEFENDIDA POR

**Viridiana Gómez Barrón**

Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ



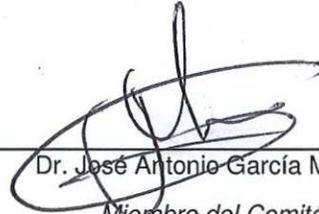
---

Raúl Tamayo Fernández  
*Director del Comité*



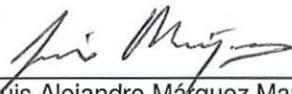
---

Dr. Ángel Gabriel Andrade Beatiga  
*Miembro del Comité*



---

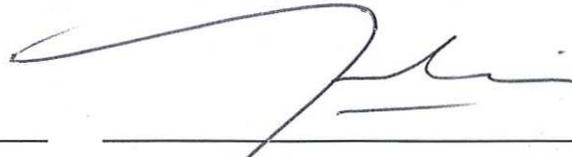
Dr. José Antonio García Macías  
*Miembro del Comité*



---

Luis Alejandro Márquez Martínez

*Coordinador del programa de posgrado en  
Electrónica y Telecomunicaciones*



---

Dr. David Hilario Covarrubias Rosales

*Director de Estudios de Posgrado*

9 de Septiembre de 2008.

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



---

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

---

**ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DE OFDM COMO MEDIO DE TRANSPORTE EN REDES  
SFN PARA TRANSMISIÓN EN BROADCAST DE VIDEO MÓVIL**

TESIS

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

Presenta:

**VIRIDIANA GÓMEZ BARRÓN**

Ensenada, Baja California, México, Septiembre de 2008.

**RESUMEN** de la tesis de **Viridiana Gómez Barrón**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de **MAESTRO EN CIENCIAS** en Electrónica y Telecomunicaciones, con orientación en Telecomunicaciones. Ensenada, Baja California. Septiembre del 2008.

### **ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DE OFDM COMO MEDIO DE TRANSPORTE EN REDES SFN PARA TRANSMISIÓN EN BROADCAST DE VIDEO MÓVIL**

Resumen aprobado por:



M.C. Raúl Tamayo Fernández

Uno de los principales problemas que enfrentan las redes 3G para la transmisión de video es que utilizan transmisión unicast, donde a cada usuario que desea recibir la señal de video le son dedicados en exclusiva recursos de radiofrecuencia, por lo que el operador se enfrenta a la escasez de espectro para soportar un gran número de usuarios. En este trabajo de tesis se realizó investigación sobre transmisión en broadcast, de manera que la misma señal de video pueda ser recibida por muchos usuarios y así resolver el problema de escasez de espectro.

A nivel de capa física, se investigó sobre el uso de la modulación OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), de acuerdo a las especificaciones del estándar para la transmisión de video móvil FLO (Forward Link Only), en redes de frecuencia única (SFN, Single Frequency Networks). En este tipo de redes todas las estaciones base utilizan la misma frecuencia en toda el área de cobertura del servicio, siendo el retardo con el que se reciben las señales de los diferentes transmisores el principal problema que enfrentan, ya que si los retardos son muy grandes, causan interferencia entre símbolos y con ello degradan la calidad del video. Sin embargo, las propiedades de OFDM pueden ayudar a que la interferencia esté en niveles que permitan una buena calidad de la señal de interés. Por lo cual es importante analizar aspectos de interferencia y cobertura al utilizar este tipo de redes y este tipo de modulación.

**Palabras Clave:** OFDM, SFN, interferencia, cobertura.

**ABSTRACT** of the thesis presented by **Viridiana Gómez Barrón** as a partial requirement to obtain the MASTER OF SCIENCE degree in Electronic y Telecommunications with orientation in Telecommunications. Ensenada, Baja California, México September 2008.

### **OFDM PERFORMANCE ANALYSIS IN SFN TRANSPORT NETWORKS FOR BROADCAST MOBILE VIDEO TRANSMISSION**

3G networks face a problem in video transmission because they use unicast transmission, where each user that receive the video signal is dedicated radio frequency resources in exclusive; this leads to frequency lack for mobile providers if they want to support a great number of users. This thesis make research on broadcast transmission, such the same video signal can be received by multiple users and thus solving the problem of frequency scarcity.

At physical layer, the research was on the use of OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), according to the specifications of the mobile video standard FLO (Forward Link Only), together with the use of Single Frequency Networks (SFN). In a SFN all the base stations use the same frequency in all the service coverage area, being the main problem that at the receiver arrive signals of the different transmitters; if the delay of the different signal are very big, they cause intersymbol interference and this degrade the video quality. Nevertheless, the OFDM properties can help to reduce the interference levels such a good quality signal is obtained. This is the mean reason to analyze interference and coverage aspects when using this type of networks and modulation.

**Keywords:** OFDM, SFN, interference, coverage.

## **Dedicatorias**

A mis padres *María Isabel* y *Oscar Rubén* quienes me han brindado su apoyo incondicional en cada etapa de mi vida.

A mis hermanos, Isabel, Catalina, Karina, Luciano y Oscar Rubén quienes con su particular manera de ser, cada uno me ha motivado a terminar.

A las diablillas de mis sobrinitas, Patricia, Kattia, Perla y Estefanía quienes por mas cansada, molesta o triste que este siempre me hacen reír y olvidar los malos ratos.

A mi niño simpático Oscar Rafael, mi único sobrino.

A mis amigos de toda la vida Freddy Junior, María Azucena y Edgar Noé quienes sin importar la distancia siempre han estado presentes.

## **Agradecimientos.**

A mis plebes: Nereyda, Silvia, Karina, Arnulfo, Oscar, Aldo y Obed, que sin ellos la estancia en CICESE no habría sido para nada lo mismo, los extrañaré muchísimo, gracias por haberme brindado su incondicional y valiosa amistad. Esperen el libro dentro de 5 años, bueno tal vez 6 de que llegara llegara!!!.

A mi director de tesis, Raúl Tamayo Fernández, por el tiempo, apoyo y recomendaciones aportadas para la realización de este trabajo

A los miembros del comité Dr. Ángel Gabriel Andrade Reatiga, Dr. José Antonio García Macías y Dr. Jaime Sánchez García por los acertados comentarios para mejorar y concluir este trabajo.

Al personal de CICESE, en especial a las secretarias del departamento por las atenciones brindadas.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para la realización de los estudios de Maestría.

## CONTENIDO

	<b>Página</b>
<b>Resumen en español</b> .....	i
<b>Resumen en inglés</b> .....	ii
<b>Dedicatorias</b> .....	iii
<b>Agradecimientos</b> .....	iv
<b>Contenido</b> .....	v
<b>Lista de Figuras</b> .....	viii
<b>Lista de Tablas</b> .....	x
<b>Capítulo I. Introducción</b> .....	1
I.1 Antecedentes.....	1
I.2 Planteamiento del Problema.....	4
I.3 Objetivo.....	4
I.4 Materiales y Métodos.....	4
I.5 Alcance de la Tesis.....	5
I.6 Organización de la Tesis.....	5
<b>Capítulo II. Multicanalización por División de Frecuencias Ortogonales (OFDM)</b> .....	7
II.1 Historia de OFDM.....	7
II.2 Bases de OFDM.....	9
II.2.1 Importancia de la Ortogonalidad.....	11
II.2.2 Generación de las subportadoras usando la IFFT.....	12
II.2.3 Intervalo de Guarda y Extensión Cíclica.....	15
II.2.4 Sistema Básico OFDM.....	16
II.3 Ventajas y Desventajas de OFDM.....	17
II.3.1 OFDM utiliza de forma más eficiente el ancho de banda.....	17
II.3.2 OFDM combate los efectos de la interferencia entre símbolos.....	18
II.3.3 OFDM combate los efectos de desvanecimientos selectivos en frecuencia y ráfagas de errores.....	18
II.3.4 Desventajas de OFDM.....	18

## CONTENIDO (Continuación)

	<b>Página</b>
II.4 Aplicaciones de OFDM.....	19
II.4.1 Sistema DAB (Digital Audio Broadcasting).....	19
II.4.2 Sistema DVB (Digital Video Broadcasting).....	20
II.4.2.1 Sistema DVB-T (Digital Video Broadcasting-Terrestrial) .....	21
II.4.2.2 DVB Para terminales portátiles (DVB-H) .....	21
II.4.3 Sistema WLAN .....	22
II.4.4 Sistema MediaFLO .....	23
II.5 Canal de comunicaciones inalámbrico.....	24
II.5.1 Pérdidas por propagación para el espacio libre.....	25
II.5.2 Efectos de las Multitrayectorias .....	25
II.5.2.1 Desvanecimientos Rayleigh .....	26
II.5.2.2 Dispersión en el retardo .....	27
II.5.2.3 Desplazamiento Doppler.....	28
II.5.3 Canal AWGN.....	28
<b>Capítulo III. Sistema MediaFLO y Redes de Frecuencia Única (SFN) .....</b>	<b>29</b>
III.1 Sistema MediaFLO .....	29
III.2 Proceso de Generación de datos en FLO .....	31
III.3 Principales Características de OFDM en FLO .....	33
III.4 Redes de Frecuencia única (SFN).....	36
III.5 Características de una red SFN.....	37
III.6 Ventajas y desventajas de redes SFN .....	38
III.6.1 Ventajas de redes SFN.....	38
III.6.2 Desventajas de redes SFN.....	39
III.7 Planificación de redes de frecuencia única.....	39
<b>Capítulo IV. Descripción del Modelo de Simulación.....</b>	<b>42</b>
IV.1 Introducción.....	42
IV.2 Modelo de simulación de un sistema OFDM .....	43
IV.3 Descripción de los bloques del modelo de simulación.....	43

## CONTENIDO (Continuación)

	<b>Página</b>
IV.3.1 Generador de datos aleatorio .....	45
IV.3.2 Codificador Reed Solomon .....	45
IV.3.3 Entrelazado .....	46
IV.3.4 Modulación de datos.....	47
IV.3.5 Estimación de canal con secuencia de entrenamiento .....	47
IV.3.6 Modulación OFDM .....	48
IV.3.6.1 Transformada inversa rápida de Fourier (IFFT).....	48
IV.3.6.2 Prefijo cíclico.....	48
IV.3.7 Canal.....	48
IV.3.8 Receptor.....	48
IV.4 Modelo de red de frecuencia única (SFN).....	49
IV.4.1 Filtro coseno elevado.....	50
IV.5 Parámetros de simulación.....	51
<b>Capítulo V. Simulación y Análisis de Resultados .....</b>	<b>52</b>
V.1 Introducción .....	52
V.2 Escenarios de simulación.....	53
V.2.1 Primer escenario: Efectos del ruido blanco, atenuación por propagación y velocidad de transmisión en un sistema OFDM.....	53
V.2.2 Segundo escenario: Efectos del ruido blanco, atenuación por propagación, multitrayectorias y movilidad del receptor en un sistema OFDM.....	57
V.2.3 Tercer escenario: Cobertura en una red de frecuencia única. ....	59
V.2.3.1 Cálculo de cobertura en una red SFN con dos transmisores.....	59
V.2.3.2 Cálculo de cobertura en una red SFN con tres transmisores .....	61
V.2.3.3 Cálculo de cobertura en una red SFN con 7 transmisores .....	64
<b>Capítulo VI. Conclusiones y Recomendaciones .....</b>	<b>66</b>
VI.1 Conclusiones.....	66
VI.2 Recomendaciones .....	67
<b>Referencias .....</b>	<b>68</b>

## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura</i>	<b>Página</b>
Figura 1. (a) Técnica multiportadora convencional y (b) técnica de modulación utilizando subportadoras ortogonales. ....	10
Figura 2. Ejemplo de tres subportadoras en un símbolo OFDM. ....	11
Figura 3. Espectro de las subportadoras individuales. ....	12
Figura 4. Modulador OFDM. ....	14
Figura 5. Efecto de multitrayectoria al no haber señal en el intervalo de guarda; la subportadora retardada 2 causa ICI en la subportadora 1 y viceversa. ....	15
Figura 6. Símbolo OFDM con extensión cíclica. ....	16
Figura 7. Diagrama a bloques de un sistema OFDM. ....	17
Figura 8. Señal con Multitrayectorias. ....	26
Figura 9. Generación de datos. ....	30
Figura 10. Símbolo OFDM. ....	34
Figura 11. En una SFN las señales útiles llegan de transmisores cercanos (-), mientras transmisores localizados lejos del receptor contribuyen a la señal de interferencia (--). ....	36
Figura 12. Los niveles permitidos de los tres tipos de interferencia son estrictamente regulados. ....	41
Figura 13. a) Símbolo transmitido $r_s$ . El símbolo está compuesto del intervalo útil $T_u$ y el intervalo de guarda $T_g$ . b) Señales retardadas por las multitrayectorias en comparación con la ventana $T_u$ usada para detección en el receptor. ....	41
Figura 14. Diagrama a bloques de un sistema OFDM. ....	43
Figura 15. Diagrama a bloques de un sistema COFDM. ....	44
Figura 16. Modelo de red de frecuencia única. ....	49
Figura 17. Modelo en Simulink de un sistema OFDM. ....	54
Figura 18. BER vs. Distancia para diferentes $E_s/N_0$ a 200 kbps. ....	55
Figura 19. BER vs. Distancia para diferentes $E_s/N_0$ a 250 kbps. ....	56
Figura 20. BER vs. Distancia para diferentes $E_s/N_0$ a 300 kbps. ....	56
Figura 21. Modelo en Simulink de un sistema OFDM, en un canal con multitrayectorias. ....	57
Figura 22. BER vs. Distancia para diferentes $E_s/N_0$ a 250 kbs, canal con multitrayectorias. ....	58

## LISTA DE FIGURAS (Continuación)

<i>Figura</i>	<b>Página</b>
Figura 23. Modelo en Simulink para evaluar interferencia entre de 2 transmisores .....	59
Figura 24. Puntos importantes a evaluar en una red SFN.....	60
Figura 25. Modelo en Simulink para evaluar interferencia .....	61
Figura 26. Localizaciones importantes para una red SFN.....	62
Figura 27. Red de frecuencia única con 7 transmisores .....	64

## LISTA DE TABLAS

<i>Figura</i>	<b>Página</b>
Tabla I. Parámetros de OFDM en FLO .....	35
Tabla II. Parámetros de simulación .....	51
Tabla III. BER para una red SFN con 2 transmisores .....	60
Tabla IV. BER para una red SFN con 3 transmisores: Cuando el receptor se encuentra a la misma distancia de cada uno de ellos. ....	63
Tabla V. BER para una red SFN con 3 transmisores: Cuando el receptor se encuentra a la misma distancia de dos de ellos y mas alejado del tercero. ....	63
Tabla VI. BER para una red SFN con 3 transmisores: Cuando el receptor se encuentra a diferente distancia de cada uno de ellos.....	63
Tabla VII. BER para una red SFN con 7 transmisores: Cuando el receptor se encuentra a diferente distancia de cada uno de ellos.....	65

## Capítulo I

---

### Introducción

---

#### I.1 Antecedentes

En los últimos años, varias circunstancias han contribuido a que el video en Internet se convierta en un fenómeno emergente (Dans, 2007). Por un lado, la mejora en los algoritmos de codificación y compresión de contenidos audiovisuales, a la vez que más gente cuenta con mejores accesos a Internet (más ancho de banda); además de la participación de los usuarios con contenido auto-generado. Este fenómeno del contenido audiovisual en Internet es similar al que presentó el desarrollo del entorno gráfico de la Web.

Por su parte, las redes inalámbricas han cambiado la forma en que la gente se comunica, trabaja y entretiene, ya que gracias a los avances en la tecnología, éstas ofrecen comunicación en cualquier instante, en cualquier parte, con cualquier persona, a un costo razonable (3G Americas (1), 2005).

Dentro de las comunicaciones móviles multimedia, el máximo exponente al día de hoy es la TV móvil. Los teléfonos móviles actuales ya disponen de radio, reproductor de música, cámara digital y grabador de video, y la TV móvil será pronto una nueva característica. Recientes estudios de mercado han revelado un gran interés por parte de los consumidores, y se prevé que la demanda de estos servicios explotará en el 2011, con más de 500 millones de usuarios en todo el mundo (Orgad, 2006).

Aunque será necesario adaptar los contenidos al entorno móvil, será posible ofrecer un servicio mucho más rico y personalizado que la TV convencional, abriendo un abanico de nuevos servicios para los consumidores, y proporcionando nuevas vías de negocio para todos los agentes de la industria audiovisual y de las telecomunicaciones. Estos servicios son además clave para el desarrollo de la Sociedad de la Información, ya que permiten el acceso universal a contenidos multimedia en cualquier momento y lugar.

Con la llegada de la tercera generación (3G), los operadores de telefonía móvil han empezado recientemente a ofrecer servicios de TV móvil (por ejemplo, en México se ofrece a través de Iusacell). Sin embargo, las ofertas actuales son considerablemente limitadas, tanto desde un punto de vista técnico como de costo de servicio, ya que la transmisión es en modo unicast, donde a cada usuario se le asignan recursos de radio en forma exclusiva durante la sesión, impidiendo su escalabilidad. Por esta razón, se están desarrollando nuevas tecnologías que utilicen transmisión en broadcast o multicast, donde una misma señal sea recibida por muchos usuarios, compartiendo así los recursos de radio (Solomon, 2007). Por lo tanto, al momento de prestar servicios de TV móvil, es importante emplear redes de radiodifusión específicamente diseñadas para servicios móviles como complemento a las redes celulares.

Las redes de frecuencia única (SFN) tienen la capacidad necesaria para soportar un consumo a gran escala de este tipo de servicios, ya que pueden distribuir servicios multimedia de banda ancha en áreas extensas sin limitación alguna en el número de usuarios que pueden recibir el servicio.

Actualmente hay varias propuestas de estándares para transmisión de video móvil en modo broadcast, por ejemplo: DVB-H (Digital Video Broadcasting for Handhelds), impulsado fuertemente por la Unión Europea; y FLO (Forward Link Only), desarrollado por la compañía Qualcomm.

Las tecnologías propuestas para transmisión de video móvil plantean el uso de OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) como medio de transporte, bajo una arquitectura tipo SFN (Single Frequency Networks, redes de frecuencia única) (Chan, 2006; Chuberre, 2006), con lo cual se logra un mejor aprovechamiento del espectro, el cual es muy caro y escaso para los operadores móviles.

La posibilidad de crear una red SFN constituye una de las grandes ventajas de un sistema basado en OFDM. Dado que la señal puede llegar a un receptor desde varios transmisores, dentro del intervalo del símbolo, se puede producir una suma de todas las señales de la red. Así, este efecto, produce una ganancia dentro de la red. Por lo cual, entre las ventajas de una red de frecuencia única se pueden mencionar: menor potencia de transmisión debido a que poseen una ganancia interna, alta probabilidad de localización, y facilidad de rellenar zonas vacías con reuso de frecuencias. La interferencia producida por la propia red SFN debido a transmisores lejanos puede mantenerse dentro de márgenes lo suficientemente pequeños como para no afectar demasiado a la señal de interés. Además, mejora sus prestaciones si se utiliza OFDM, ya que ésta técnica de modulación digital de espectro ensanchado permite alcanzar una buena calidad en entornos hostiles como lo es el canal radio.

Las principales decisiones en la planificación de una red SFN son el número de estaciones base y sus ubicaciones, con sus parámetros asociados, tales como potencia de transmisión, altura, configuración de la antena, etc. En los receptores, la calidad de la señal recibida dependerá principalmente de la relación señal a interferencia más ruido SINR (Signal to Interference plus Noise Ratio). Por lo que el nivel de cobertura de una estación base se definirá como el porcentaje de localizaciones cuya SINR supera un umbral mínimo que depende del modo de transmisión y de la velocidad del móvil (Gómez *et al*, 2007).

Por lo tanto, es importante analizar el desempeño de OFDM como medio de transporte para una red de frecuencia única, utilizada en la transmisión de video para receptores móviles, el cual posee características distintas a las de la transmisión hacia receptores fijos.

## **I.2 Planteamiento del Problema**

Actualmente el servicio de video móvil se ofrece sobre redes 3G en modo unicast. Uno de los problemas con este modo de transmisión es que la calidad del video es afectada por la cantidad de usuarios, lo cual impide su escalabilidad. Por ello se desea la transmisión de video en broadcast utilizando modulación OFDM en una arquitectura de red de frecuencia única para que una misma señal sea recibida por muchos usuarios, compartiendo así los recursos de radio.

En una red SFN la interferencia provocada por transmisores lejanos puede ser grande, por lo cual se debe evaluar como afecta esta interferencia al momento de determinar el área de cobertura donde se ofrecerá el servicio de video móvil.

## **I.3 Objetivo**

Realizar análisis de interferencia dentro de una red SFN para determinar el área de cobertura de esta, utilizando OFDM como esquema de modulación de acuerdo a las especificaciones del estándar de video móvil por broadcast Forward Link Only (FLO).

## **I.4 Materiales y Métodos**

Para cumplir con el objetivo de la tesis primero se realizó el análisis y síntesis de la literatura relacionada con el tema, para conocer los parámetros y funcionamiento de una red SFN de video móvil con sus características de transmisión en broadcast y modulación

OFDM, con la finalidad de realizar un modelo en Matlab Simulink que permita determinar la cobertura e interferencia de este tipo de redes.

El material requerido para realizar el trabajo de tesis fue literatura de bibliotecas e Internet y el software de simulación Matlab Simulink.

## **I.5 Alcance de la Tesis**

Este proyecto se limita a simular un sistema OFDM de acuerdo a las características establecidas en el estándar para la transmisión de video móvil Forward Link Only (FLO), sin considerar todos los bloques de codificación de canal que maneja el estándar para la generación de datos (en el capítulo III se encuentra una descripción detallada del proceso completo), con la finalidad de determinar el área de cobertura de una red de frecuencia única.

El canal es modelado de acuerdo a las consideraciones explicadas en el capítulo II.

La red SFN fue implementada utilizando Matlab Simulink y todos los resultados son presentados en términos de la tasa de bit erróneo (BER).

## **I.6 Organización de la Tesis**

En el segundo capítulo se sintetiza literatura acerca de un sistema OFDM y las principales características del canal radio utilizado para la transmisión.

Con la literatura recopilada acerca de las redes de frecuencia única y del sistema MediaFLO se escribió el tercer capítulo.

En el cuarto capítulo se describen a detalle cada uno de los bloques del modelo de simulación para implementar una red SFN utilizando OFDM como esquema de modulación en Matlab Simulink.

En el quinto capítulo se presentan los resultados y su análisis.

Finalmente, en el sexto capítulo se concluye de acuerdo a los resultados y se hacen las recomendaciones para extender el alcance de la simulación.

### Multicanalización por División de Frecuencias Ortogonales (OFDM)

---

#### II.1 Historia de OFDM

El desarrollo de OFDM comienza en la década de los 60's cuando Chang publicó su artículo sobre síntesis de señales en banda limitada para transmisión multicanal. El presentó un principio para la transmisión simultánea de mensajes por un canal de banda limitada sin ICI (Interference Inter Channel), ni ISI (Interference Intersymbol) (Chang, 1966). Poco después de que Chang presentó su artículo, Saltzberg realizó el estudio de su desempeño, donde concluyó que “la estrategia para diseñar un sistema de transmisión paralela eficiente debe concentrarse en reducir la interferencia de canales adyacentes mas que en perfeccionar el canal individual en sí, dado que las distorsiones debidas a la interferencia dominan” (Saltzberg, 1967). Esta es una conclusión importante, la cual ha sido probada con el procesamiento digital de señales en banda base que han surgido en los últimos años.

Una de las principales contribuciones a OFDM fue presentada en 1971 por Weinstein y Ebert, quienes utilizaron la transformada discreta de Fourier (DFT), para realizar la modulación y demodulación en banda base. Este trabajo no se enfoca en “perfeccionar los canales individuales”, sino en introducir un procesamiento eficiente, eliminando los bancos de osciladores de subportadoras. Para eliminar la ISI y la ICI, usaron un espacio de guarda entre los símbolos y una ventana coseno-elevado en el dominio del tiempo (Weinsten y

Ebert, 1971). Su sistema no obtuvo una ortogonalidad perfecta entre subportadoras en un canal dispersivo, sin embargo fue una contribución importante a OFDM

Peled y Ruiz en 1980 introdujeron el prefijo cíclico (CP) o extensión cíclica, resolviendo el problema de ortogonalidad. En lugar de usar un espacio de guarda vacío, ellos lo llenaron con una extensión cíclica del símbolo OFDM (Peled y Ruiz, 1980).

Esto simula eficientemente un canal que realiza la convolución cíclica, lo cual implica ortogonalidad sobre canales dispersivos cuando el prefijo cíclico es mayor que la respuesta al impulso del canal. Introduciendo una pérdida de potencia proporcional a la longitud del prefijo cíclico, pero la cero ICI generalmente motiva las pérdidas. (Edfors et al, 1996).

A continuación se presenta un resumen de la evolución de OFDM.

- 1957: Sistema Kineplex, un módem HF multiportadora.
- 1966: Chang, Bell Labs: OFDM paper y patente.
- 1971: Weinstein y Ebert proponen el uso de la FFT.
- 1980: Introducción del prefijo cíclico por Peled y Ruiz.
- 1985: Cimini describe el uso de OFDM para comunicaciones móviles.
- 1987: Alard y Lasalle: uso de OFDM en radiodifusión digital.
- 1993: Morris: una LAN inalámbrica experimental de 150Mbps, usando OFDM.
- 1994: US patent 5.282.222: Método y aparato para acceso múltiple entre transceptores en comunicaciones inalámbricas usando OFDM de espectro extendido.
- 1995: Estándar ETSI DAB: primer estándar basado en OFDM.
- 1997: Estándar ETSI DVB-T.
- 1998: Proyecto Magic WAND demuestra el uso de módems OFDM para WLAN.

- 1999: Estándar WLAN IEEE 802.11a (WiFi).
- 2000: Accesos fijos inalámbricos propietarios.
- 2002: Estándar WLAN IEEE 802.11g (WiFi ampliamente usado hoy en día).
- 2004: Estándar WMAN IEEE 802.16 (WiMAX).
- 2004: Estándar ETSI DVB-H.
- 2004: Candidato para estándar WPAN IEEE 802.15.3a (UWB, MB-OFDM).
- 2004: Candidato para estándar en la próxima generación de WLAN, IEEE 802.11n.
- 2005: Candidato para telefonía móvil celular 3.75G (3GPP y 3GPP2).
- 2005: Candidato para estándar 4G.

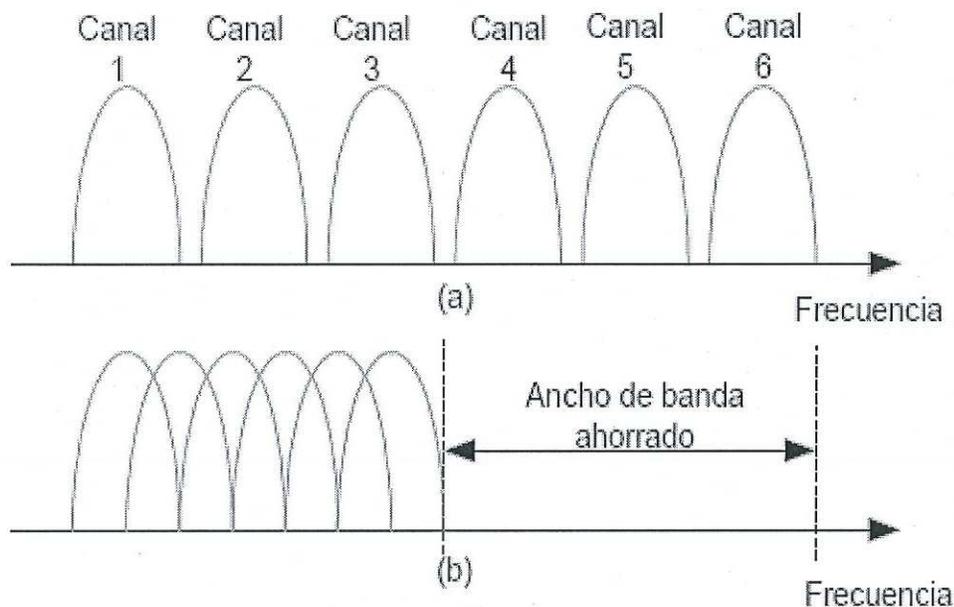
OFDM actualmente es usado en los estándares europeos DAB (Digital Audio Broadcasting), DVB-T (Digital Video Broadcasting-Terrestrial), DVB-H (Digital Video Broadcasting- Handheld), los estándares japoneses ISDB-T (Integrated Services Digital Broadcasting- Terrestrial), S-DMB (Satellite-Digital Multimedia Broadcasting) y el estándar americano FLO (Forward Link Only).

## **II.2 Bases de OFDM**

La multicanalización por división de frecuencias ortogonales (OFDM) es una versión óptima de la transmisión multiportadora, que se basa en esparcir los datos a ser transmitidos sobre un gran número de subportadoras, cada una de ellas modulada a baja velocidad.

Una de las principales características de OFDM es que permite el traslape entre las subportadoras, a diferencia de la transmisión multiportadora convencional (FDM, Frequency Division Multiplexing), donde existen bandas de guarda entre las subportadoras.

En la figura 1 se ilustra la diferencia entre la técnica convencional multiportadora y la técnica OFDM, donde se observa el mejor aprovechamiento del ancho de banda para esta última.



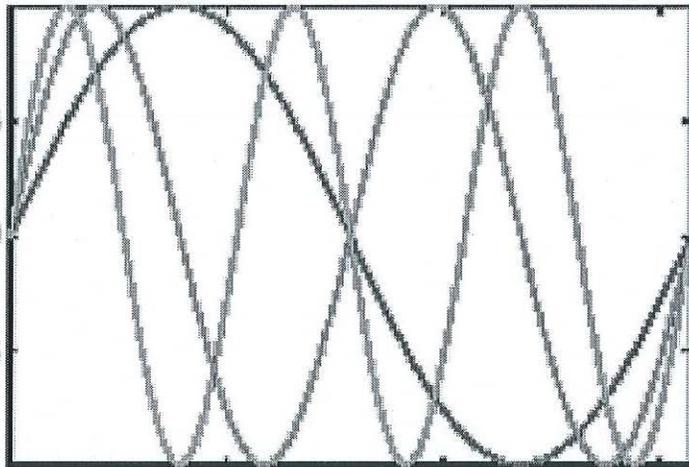
**Figura 1. (a) Técnica multiportadora convencional y (b) técnica de modulación utilizando subportadoras ortogonales.**

OFDM incrementa la robustez en contra de desvanecimientos selectivos en frecuencia o interferencia de banda estrecha. En un sistema de portadora simple, un simple desvanecimiento o interferencia puede causar la falla total del enlace, pero en un sistema multiportadora, solamente un pequeño porcentaje de las subportadoras es afectado. Se utilizan códigos correctores de errores para recuperar la información de las pocas subportadoras que llegan erróneas (Van Nee y Prasad, 2000).

## II.2.1 Importancia de la Ortogonalidad

La ortogonalidad indica que debe existir una relación matemática precisa entre las frecuencias de las subportadoras del sistema, de tal forma que no exista interferencia entre éstas debido a los traslapes. En este caso las subportadoras que son ortogonales pueden ser distinguidas una de otra en el receptor.

La ortogonalidad puede ser vista tanto en el tiempo como en la frecuencia en ambos casos el principio general es no traslapar el valor de la señal portadora, sino únicamente sus bandas laterales.



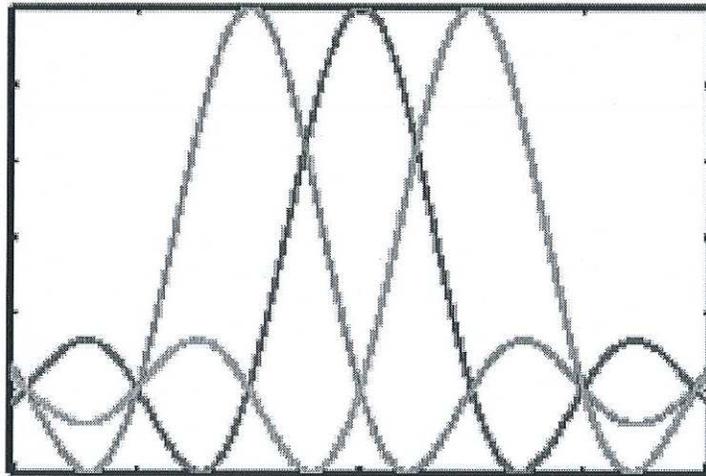
**Figura 2. Ejemplo de tres subportadoras en un símbolo OFDM.**

Como ejemplo, en la figura 2 se muestran tres subportadoras de un símbolo OFDM. Hay que notar que cada subportadora tiene un número entero de ciclos y que el número de ciclos entre subportadoras adyacentes difiere por uno. Esta propiedad es necesaria para la ortogonalidad entre subportadoras.

La ortogonalidad entre las diferentes subportadoras OFDM puede verse de la siguiente manera. De acuerdo a la ecuación (1), cada símbolo OFDM contiene subportadoras que no

son cero sobre un intervalo  $T$ , de ahí que el espectro de un símbolo OFDM sea una convolución de un grupo de pulsos de Dirac localizados en las frecuencias subportadoras, con el espectro de un pulso cuadrado, que es uno para el período  $T$  y cero para otro tiempo.

La amplitud del espectro del pulso cuadrado es una función  $Sinc(\pi fT)$ , con ceros para todas las frecuencias  $f$  múltiplos de  $1/T$ . Este efecto se muestra en la figura 3, donde se ven los espectros de las portadoras individuales traslapándose. En el máximo de cada subportadora todos los demás espectros de frecuencias son cero. El receptor OFDM esencialmente calcula los valores del espectro en esas partes máximas, de esta forma demodula cada subportadora, libre de interferencia de las otras (Van Nee y Prasad, 2000).



**Figura 3. Espectro de las subportadoras individuales.**

### **II.2.2 Generación de las subportadoras usando la IFFT**

La señal OFDM consiste en una serie de símbolos OFDM, resultado de la suma de las subportadoras, las cuales son moduladas utilizando la técnica de modulación PSK (por desplazamiento de fase) o QAM (modulación de amplitud en cuadratura).

Matemáticamente un símbolo OFDM puede ser escrito como sigue (Van Nee y Prasad, 2000):

$$s(t) = \operatorname{Re} \left\{ \sum_{i=-\frac{N_s}{2}}^{\frac{N_s}{2}-1} d_{i+\frac{N_s}{2}} e^{j2\pi\left(f_c - \frac{i+0.5}{T}\right)(t-t_s)} \right\}, t_s \leq t \leq t_s + T \quad (1)$$

$$s(t) = 0, \quad t < t_s \wedge t > t_s + T$$

donde se considera  $d_i$  como los símbolos complejos (QAM o PSK),  $N_s$  el número de subportadoras,  $T$  como la duración del símbolo,  $f_c$  la frecuencia de portadora y  $t_s$  es el tiempo de inicio de un símbolo OFDM.

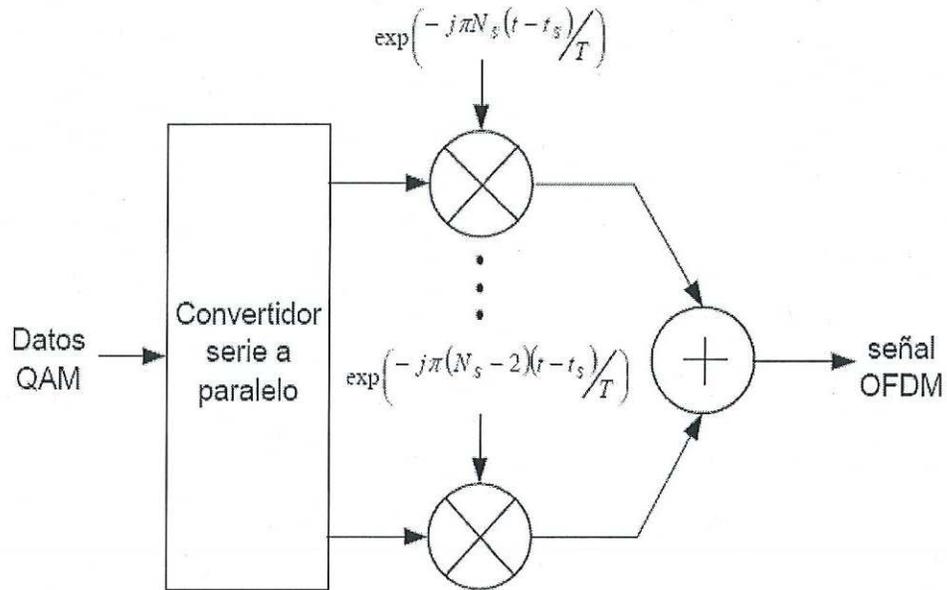
Comúnmente se utiliza la notación en banda base compleja equivalente, como se muestra en la ecuación (2) (Van Nee y Prasad, 2000):

$$s(t) = \left\{ \sum_{i=-\frac{N_s}{2}}^{\frac{N_s}{2}-1} d_{i+\frac{N_s}{2}} e^{j2\pi\frac{i}{T}(t-t_s)} \right\}, t_s \leq t \leq t_s + T \quad (2)$$

$$s(t) = 0, \quad t < t_s \wedge t > t_s + T$$

En esta representación, las partes real e imaginaria corresponden a las componentes de fase y cuadratura de la señal OFDM, las cuales tienen que ser multiplicadas por un coseno y seno de la frecuencia portadora deseada para producir la señal OFDM final.

En la figura 4 se muestra el diagrama a bloques de la operación de un modulador OFDM.



**Figura 4. Modulador OFDM.**

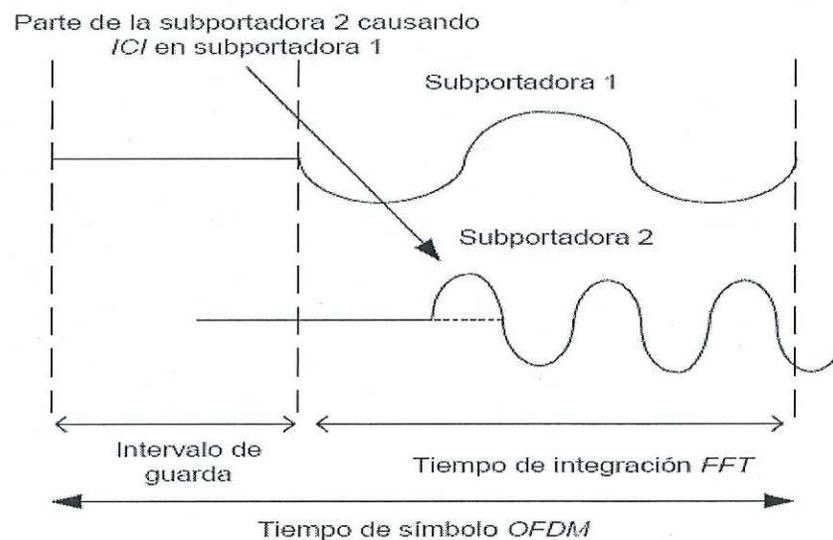
La señal OFDM en banda base compleja definida en la ecuación (2) es la transformada inversa de Fourier IFT de los  $N_s$  símbolos. Su equivalente en tiempo discreto está dada por la transformada discreta inversa de Fourier IDFT en la ecuación (3), donde  $t$  se reemplaza por  $n$  número de muestras (Van Nee y Prasad, 2000).

La transformada inversa rápida de Fourier IFFT es una herramienta computacional que facilita el análisis de señales, ya que es una técnica para el cálculo eficiente de la transformada discreta inversa de Fourier IDFT (Cochran et al., 1967). De ahí que la IDFT puede implementarse muy eficientemente por medio de la IFFT, reduciendo en gran medida la cantidad de cálculos (Brigham, 1998).

$$s(n) = \sum_{i=0}^{N_s} d_i e^{j2\pi \frac{in}{N}} \quad (3)$$

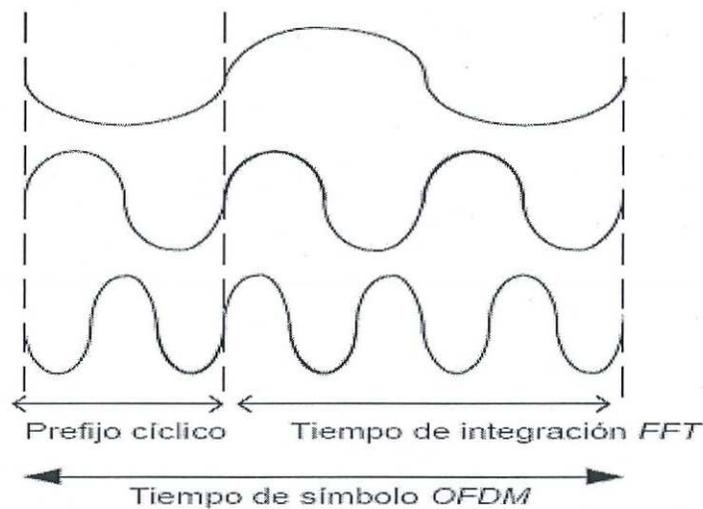
### II.2.3 Intervalo de Guarda y Extensión Cíclica

El principal problema que enfrentan las comunicaciones inalámbricas es la presencia de multitrayectorias; un ambiente de multitrayectorias ocasiona que la señal transmitida tome diferentes direcciones. Como resultado de esto, al receptor llegan múltiples versiones de la señal transmitida. Esto implica que los diferentes símbolos de la señal llegarán con diferentes retardos, provocando que símbolos consecutivos se interfieran entre sí. Para reducir la interferencia entre símbolos (ISI), se introduce un intervalo de guarda por cada símbolo OFDM, la longitud de dicho intervalo es seleccionado de tal modo que sea mayor a la dispersión en el retardo esperada. El intervalo de guarda puede consistir de información nula, es decir, de ausencia de señal. Sin embargo, en este caso se genera el problema de interferencia entre subportadora ICI, ya que se pierde la ortogonalidad entre las subportadoras, lo cual se ilustra en la figura 5.



**Figura 5. Efecto de multitrayectoria al no haber señal en el intervalo de guarda; la subportadora retardada 2 causa ICI en la subportadora 1 y viceversa.**

Cuando el receptor OFDM intenta demodular la primera subportadora, encuentra interferencia de la segunda debido a que en el intervalo de la FFT no hay un número entero de ciclos entre la subportadora 1 y la subportadora 2, lo que destruye la ortogonalidad entre las subportadoras. Para combatir la ICI, se extiende el símbolo OFDM cíclicamente en el intervalo de guarda, como se observa en la figura 6. Esto asegura que las réplicas retardadas de un símbolo OFDM tengan siempre un número entero de ciclos dentro del intervalo de la FFT, siempre y cuando el retardo sea menor que el intervalo de guarda.



**Figura 6. Símbolo OFDM con extensión cíclica**

## II.2.4 Sistema Básico OFDM

En la figura 7 se muestra un diagrama a bloques de un sistema OFDM, donde el primer paso para generar una señal OFDM es codificarla, posteriormente se modula con alguna técnica como PSK ó QAM, enseguida el tren de símbolos resultante de la modulación se convierte de serie a paralelo, lo cual genera  $N$  trenes de pulsos de menor velocidad ( $N$  veces menor). A cada uno de estos trenes de pulsos de baja velocidad se les realiza la transformada inversa de Fourier, para pasarlos del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo y cada una de las frecuencias resultantes deben ser ortogonales entre sí.

Generalmente se cumple la condición de ortogonalidad solo con que sean frecuencias armónicas unas de otras. Es decir, que una frecuencia sea múltiplo de otra. El siguiente paso es agregar el prefijo cíclico y finalmente sumar las frecuencias ortogonales y modularlas en una sola portadora, que es la frecuencia a la que se transmitirá. En el receptor se hace el proceso inverso. (Prasad, 2004)

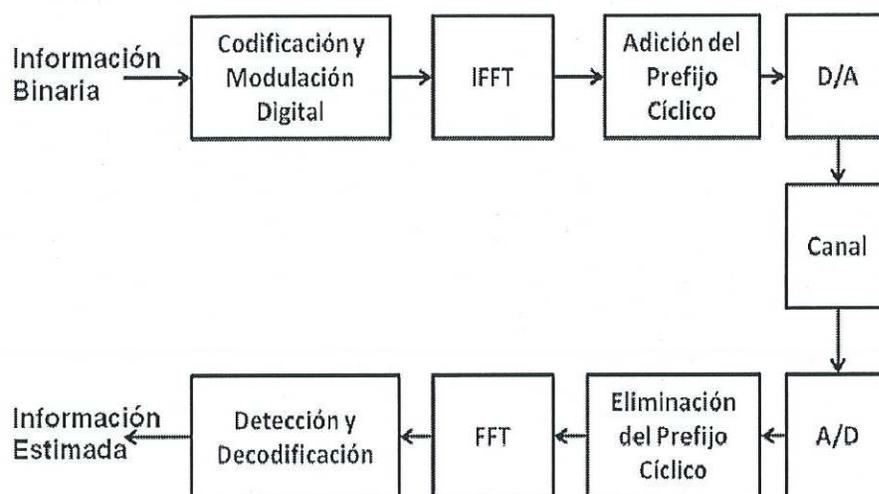


Figura 7. Diagrama a bloques de un sistema OFDM

## II.3 Ventajas y Desventajas de OFDM

### II.3.1 OFDM utiliza de forma más eficiente el ancho de banda

En OFDM, cada subportadora es ortogonal a las otras subportadoras. La ortogonalidad significa que el espectro de cada subportadora tiene un nulo en la frecuencia central de otras subportadoras del sistema. Como resultado no hay interferencia entre estas aunque su espectro se traslape, permitiendo que estas estén separadas lo menos posible. Esto supera el problema de “overhead” del espaciamiento entre subportadoras (Van Nee y Prasad, 2000).

### **II.3.2 OFDM combate los efectos de la interferencia entre símbolos**

El efecto de la ISI es poner un límite al envío de información a altas tasas de bit. En sistemas de comunicación que incrementan su velocidad de transferencia de información, el tiempo de cada símbolo se hace más pequeño. Además por el retardo causado por las multitrayectorias, los símbolos comienzan a traslaparse unos con otros y provocan ISI. OFDM evita este problema por el envío de transmisiones simultáneas a muy baja velocidad usando muchas frecuencias. Y colocando un intervalo de guarda que está compuesto por la extensión cíclica del símbolo OFDM, que debe ser mayor a la dispersión en el retardo.

### **II.3.3 OFDM combate los efectos de desvanecimientos selectivos en frecuencia y ráfagas de errores**

OFDM se utiliza para separar la frecuencia de salida de muchos símbolos que pasan por desvanecimientos selectivos. Esto aleatoriza eficientemente ráfagas de errores causados por desvanecimientos o interferencia impulsiva, de modo de que en lugar de que varios símbolos adyacentes estén totalmente destruidos muchos símbolos son ligeramente distorsionados. Esto permite la reconstrucción de la mayoría de estos incluso sin códigos correctores de errores (FEC). Porque dividiendo el ancho de banda del canal en muchas pequeñas sub-bandas, la respuesta en frecuencia sobre cada sub-banda es relativamente plana (Van Nee y Prasad, 2000).

### **II.3.4 Desventajas de OFDM**

- Las variaciones en frecuencia de las subportadoras degradan de manera considerable la calidad del enlace, ya que se pierde la ortogonalidad y las subportadoras interfieren entre sí, fenómeno que se conoce como ICI (Inter Carrier Interference).

- Alto valor en la relación de potencia pico a potencia promedio (en inglés peak to average power ratio -PAPR-)
- Se requieren altas capacidades de procesamiento de señales debido a la complejidad de la técnica.
- Requerimiento de circuitos altamente lineales. (Jeffrey et al, 2007).

## **II.4 Aplicaciones de OFDM**

### **II.4.1 Sistema DAB (Digital Audio Broadcasting)**

Lo que actualmente se conoce como estándar europeo DAB (Digital Audio Broadcasting) es el sistema de radiodifusión digital desarrollado por el proyecto Eureka 147 de la Unión Europea impulsado por la UER (Unión Europea de Radiodifusión). El objetivo era especificar un sistema de radiodifusión digital válido para comunicaciones terrestres y por satélite.

En 1995, el European Telecommunication Standard Institute (ETSI) adoptó el sistema DAB como estándar único europeo (ETS 300 401). A nivel mundial, la Recomendación 1114 de la International Telecommunications Union (ITU) recomienda el DAB como sistema para la difusión terrestre y por satélite

El DAB es un sistema muy robusto diseñado para receptores tanto domésticos como portátiles y, especialmente, para la recepción en móviles, para difusión por satélite y difusión terrestre y que, además del audio, permite introducir datos. Esta tecnología no tiene los problemas de las señales de FM cuando se reciben muchas señales de diferentes puntos: del propio transmisor y otras reflexiones, dispersiones y difracciones que varían

con el tiempo. Lo que se consigue con el sistema DAB es que la mayor parte de las señales que entran en el receptor se sumen, es decir, que contribuyan positivamente a la recepción.

El sistema DAB utiliza OFDM con 1536 subportadoras, distribuidas en un ancho de banda de 1.5MHz, modulación DQPSK junto con códigos convolucionales recortados, donde los parámetros de OFDM son cuidadosamente ajustados a los requerimientos del canal (Martin, 2005).

#### **II.4.2 Sistema DVB (Digital Video Broadcasting)**

El estándar de televisión digital europeo, Digital Video Broadcasting (DVB), fue establecido por el European Telecommunications Standards Institute (ETSI) durante los años 90's y consiste de un conjunto de aproximadamente 30 especificaciones y documentos técnicos que cubren la vasta gama de tópicos relacionados con la distribución digital de video.

DVB fue diseñado para transmitir información de audio y video codificada de acuerdo a una versión especializada del estándar de codificación de audio y video MPEG-2. DVB contiene especificaciones para distribución de video digital por diversos medios, incluyendo satélite (DVB-S), cable (DVB-C), terrestre (DVB-T) y microondas (DVB-MS y DVB-MC). Recientemente también fue incorporada la especificación para distribución terrestre de contenido a terminales portátiles (DVB-H).

El énfasis de esta sección son las especificaciones DVB relacionadas con las normas DVB-T y DVB-H.

### II.4.2.1 Sistema DVB-T (Digital Video Broadcasting-Terrestrial)

La norma DVB-T especifica las propiedades de la capa física para la transmisión terrestre de video y audio digital, y está descrita en el estándar.

DVB-T utiliza modulación OFDM con los siguientes parámetros principales.

**Subportadoras:** Se consideran 2 modos de operación según el número de subportadoras en las cuales se subdivide la banda de transmisión. Concretamente, se tiene el modo “2k” con 2048 sub-portadoras y el modo “8k” con 8192 sub-portadoras.

**Ancho de Banda de Transmisión:** El estándar especifica explícitamente transmisiones en bandas de 5, 6, 7 y 8 MHz.

**Intervalo de Guarda:** Se especifican cuatro posibles valores para el intervalo de guarda entre símbolos OFDM, de 1/4, 1/8, 1/16 y 1/32 de la duración del símbolo OFDM. Su elección depende principalmente de la geografía del entorno de transmisión, lo que determina la dispersión del canal correspondiente.

**Modulación de Subportadoras:** Las subportadoras pueden ser moduladas con constelaciones 4-QAM, 16-QAM ó 64-QAM (Marianov et al, 2006).

### II.4.2.2 DVB Para terminales portátiles (DVB-H)

DVB-H (Digital Video Broadcast-Handhelds) es una extensión de la norma DVB-T incorporada en el 2004 para definir el formato de distribución de televisión digital terrestre a dispositivos móviles (teléfonos móviles, PDAs, etc), reutiliza la misma capa física que DVB-T solo que adiciona el modo 4k y añade elementos adicionales a la capa de enlace, siendo posible compartir la misma infraestructura de red (transmisores, multiplex, etc.).

Las principales características de DVB-H respecto a DVB-T son:

- Técnica de transmisión discontinua que reduce considerablemente el consumo de potencia de las terminales, y posibilita realizar traspasos entre celdas de forma transparente para el usuario.
- Mayor robustez de la transmisión, sobre todo en situaciones de movilidad e interferencia
- Mayor flexibilidad en el diseño de la red.

DVB-H permite la convergencia de los servicios de las tecnologías de radiodifusión y celular, por lo que no solo posibilita la transmisión de servicios como TV o radio digital móvil a audiencias masivas, sino que también servicios interactivos gracias al canal bidireccional ofrecido por la red celular (Gómez *et al*, 2007).

### **II.4.3 Sistema WLAN**

En los sistemas de comunicaciones inalámbricas para redes de área local se utiliza OFDM. Los correspondientes estándares para estas redes inalámbricas de área local (WLAN) son llamados:

- El estándar HIPERLAN/2 lanzado por la ETSI (European Telecommunications Standards Institute) en el 2000.
- El estándar IEEE 802.11a y IEEE 802.11g lanzados por la IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) en 1999 y 2003, respectivamente (Schulze y Luders, 2005).

#### **II.4.4 Sistema MediaFLO**

El sistema MediaFLO se basa en la tecnología FLO (Forward Link Only), diseñada específicamente para una distribución simultánea, eficiente y económica de contenido multimedia a millones de suscriptores a servicios inalámbricos. Reduce el costo de entregar tal contenido y mejora la experiencia del usuario, permitiendo que los clientes “naveguen” los canales de contenido en los mismos terminales (teléfonos) móviles que utilizan para los servicios tradicionales de voz y de datos.

Un sistema FLO se compone de cuatro subsistemas: el Centro de Operaciones de la Red (que consiste en un Centro de Operaciones Nacional y uno o más Centros de Operaciones Locales), Transmisores FLO, Red 3G (permite a los dispositivos móviles comunicarse con el NOC), y dispositivos habilitados para FLO (también conocidos como Terminales MediaFLO).

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

La tecnología FLO minimiza el tiempo de adquisición de canal del programa. En la mayoría de los casos, es menor a los dos segundos. Los usuarios móviles pueden navegar los canales con la misma facilidad que lo harían al utilizar sistemas satelitales o de cable en sus casas (Qualcomm, 2007). En el siguiente capítulo se da una explicación técnica detallada de la tecnología FLO.

## II.5 Canal de comunicaciones inalámbrico

La forma en que las ondas se propagan pueden variar desde algo muy sencillo hasta algo realmente complicado, las complicaciones en los medios de propagación son debidas a los obstáculos ya sean naturales o artificiales que provocan desviaciones de las ondas.

El modelado y predicción de la forma en que las ondas electromagnéticas se propagan constituyen un campo de gran interés para el diseño de redes de comunicaciones inalámbricas. Un modelo de propagación es una ecuación normalmente dada en dB (decibeles) que trata de calcular y describir las pérdidas de una señal en determinado ambiente de propagación.

Gran parte de las predicciones para un diseño son datos tomados de la realidad, que se mezclan con datos estadísticos y en algunos casos datos teóricos, y gracias a esto se logra una descripción de la forma en que las ondas se propagan.

La utilidad de los modelos está en predecir la potencia de la señal que se recibe a determinada distancia.

Los efectos a gran escala se descomponen en componentes de pérdidas de trayectoria fiable y estocástica. La parte fiable comprende las pérdidas de trayectoria dependiente de la distancia. Modelos de propagación avanzados pueden tomar en cuenta características avanzadas del terreno, tales como follaje, rugosidad o perfil de elevación del terreno a lo largo de la trayectoria transmisor-receptor (Rappaport, 1999).

### II.5.1 Pérdidas por propagación para el espacio libre

Cuando una señal se propaga a través de un canal inalámbrico se debilita, lo cual se debe principalmente a que el frente de onda crece en forma esférica reduciendo así la densidad de potencia de manera proporcional al área de la misma. Al aumentar la distancia desde el punto de emisión, el área de la misma aumenta en forma cuadrática ( $\pi r^2$ ) por lo que la densidad de potencia también disminuye en forma cuadrática, este tipo de atenuación está presente siempre, y se conoce como pérdida por propagación para el espacio libre.

El modelo de propagación para el espacio libre describe y predice la caída de potencia en relación con la distancia de separación entre el receptor y el transmisor.

La potencia recibida por una antena receptora la cual esta separada de la antena transmisora una distancia  $d$ , esta dada por la siguiente ecuación:

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \quad (4)$$

donde  $P_t$  y  $G_t$  son la potencia y la ganancia del transmisor respectivamente,  $G_r$  es la ganancia del receptor,  $\lambda$  es la longitud de onda y depende de la frecuencia de transmisión.

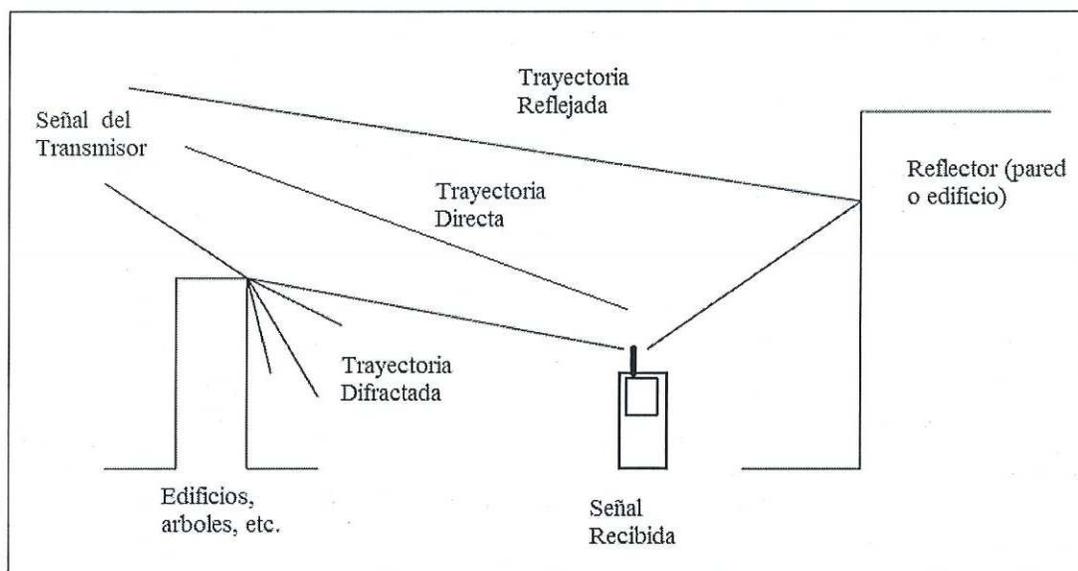
Las pérdidas por trayectoria en dB son la relación logarítmica de la potencia transmitida y la potencia recibida:

$$P_L(dB) = 10 \log \frac{P_t}{P_r} \quad (5)$$

donde  $P_r$  representa la potencia en el receptor (Rappaport, 1999).

## II.5.2 Efectos de las Multitrayectorias

Uno de los principales problemas a los que se enfrenta las comunicaciones inalámbricas, son las multitrayectorias, ya que la señal emitida por el transmisor puede seguir varias rutas, con distintos retardos, hasta llegar al receptor. Esto puede originar una interferencia constructiva o destructiva, dependiendo de la fase con que lleguen las señales al receptor. A esto hay que agregar que las rutas pueden cambiar en el tiempo, por algún cambio en el medio o por el movimiento del receptor.



**Figura 8. Señal con Multitrayectorias**

### II.5.2.1 Desvanecimientos Rayleigh

En un enlace radio, la señal RF del transmisor puede ser reflejada por varios objetos tales como: colinas, edificios, vehículos, etc. Esto da lugar a múltiples trayectorias de transmisión en el receptor.

La fase relativa de múltiples señales reflejadas puede causar interferencia constructiva o destructiva en el receptor. Esto es experimentado sobre distancias muy cortas (se observa

en distancias de hasta aproximadamente media longitud de onda), así que se les da el término de desvanecimientos rápidos (desvanecimientos Rayleigh).

La distribución Rayleigh es comúnmente empleada para describir la naturaleza estadística de la variación temporal de la envolvente de la señal recibida. La función de densidad de probabilidad Rayleigh describe las estadísticas de primer orden de la envolvente, considerando una distancia lo suficientemente pequeña tal que la media sea considerada como constante.

Las estadísticas de primer orden son aquellas para las cuales el tiempo o distancia no son considerados como factores de variación. Por lo que la distribución de Rayleigh proporciona información como el porcentaje de tiempo en el cual la envolvente de la señal cae por debajo de un nivel específico.

### **II.5.2.2 Dispersión en el retardo**

La señal recibida de un transmisor consiste típicamente de una señal directa, más las reflejadas por objetos tales como: edificios, montañas, y otras estructuras. Las señales reflejadas arriban cierto tiempo después que la señal directa porque la trayectoria extra es mayor. La dispersión en el retardo es la extensión entre la primera y la última señal multitrayectoria vista por el receptor (Rappaport, 1999).

En un sistema digital, la dispersión en el retardo puede causar interferencia entre símbolos. Esto debido a que el retardo de la señal multitrayectoria provoca el traslape con el siguiente símbolo.

### II.5.2.3 Desplazamiento Doppler

Cuando la fuente de onda y el receptor están en movimiento relativo con respecto al medio material en el cual la onda se propaga, la frecuencia de la señal recibida es diferente de la frecuencia de la señal emitida por la fuente. Cuando el receptor se acerca a la fuente la señal recibida será de mayor frecuencia que la señal de emitida, y cuando el receptor se aleje de la fuente la frecuencia será menor. Este fenómeno recibe el nombre de efecto Doppler.

El cambio de frecuencia debido al efecto Doppler depende del movimiento relativo entre la fuente y el receptor y de la velocidad de propagación de la onda. El desplazamiento en frecuencia puede ser escrito como:

$$f_d = \frac{v}{\lambda} \quad (6)$$

donde  $f_d$  representa el cambio en frecuencia,  $v$  es la velocidad del móvil,  $\lambda$  es la longitud de onda (Rappaport,1999).

### II.5.3 Canal AWGN

El ruido aditivo blanco gaussiano (AWGN), es la debilidad más básica presente en cualquier canal de comunicación, puesto que la cantidad de ruido termal en el receptor es proporcional al ancho de banda; el piso del ruido visto por los receptores de banda ancha es mucho mayor al visto en sistemas de banda estrecha tradicionales. El incremento del piso del ruido, junto con mayores pérdidas por propagación, reducen la cobertura de sistemas de transmisión de banda ancha (Jeffrey et al, 2007).

### Sistema MediaFLO y Redes de Frecuencia Única (SFN)

---

#### III.1 Sistema MediaFLO

En los últimos años, múltiples tecnologías se han propuesto entregar flujo multimedia a dispositivos móviles, tales como teléfonos celulares, dispositivos portátiles, consolas de juegos, etc. Estas tecnologías típicamente se ofrecen a celulares de tercera generación o tecnologías de difusión de TV digital terrestre.

El sistema MediaFLO está basado en la tecnología FLO (Forward Link Only), desarrollada por la empresa Qualcomm como una alternativa para la tecnología móvil multicast para la transmisión eficiente de múltiples flujos multimedia a dispositivos móviles. Utiliza canales multimedia en las bandas VHF, UHF y L. Los principales conceptos y características de la interfaz de aire FLO incluyen las técnicas de modulación y codificación usadas, estructura de la trama y los diferentes sub-canales dentro de la capa física.

La tecnología FLO optimiza simultáneamente el consumo de potencia, la diversidad de frecuencia y la diversidad de tiempo. FLO tiene una característica particular que permite acceder a una fracción de la señal total transmitida. Esta característica le permite a un dispositivo móvil FLO alcanzar una vida de batería comparable a un teléfono celular convencional (Chari et al, 2007).

La tecnología FLO minimiza el tiempo de adquisición de canal del programa. En la mayoría de los casos, es menor a los dos segundos. Los usuarios de móviles pueden navegar los canales con la misma facilidad que lo harían al utilizar sistemas satelitales o de cable en sus casas.

Para alcanzar un buen desempeño en el receptor y alta eficiencia espectral de multicasting multimedia en un ambiente de comunicaciones móviles, la capa física de FLO usa Multiplexión por División de Frecuencias Ortogonales (OFDM) como técnica de modulación. Además incorpora una técnica avanzada de corrección de errores que involucra la concatenación de un código Reed Solomon y un turbo código. Al código Reed Solomon se le llama codificador externo y al turbo código codificador interno. Esta denominación está relacionada con el hecho que el turbo código está mas cerca del canal, mientras que el codificador de bloque está cerca de la fuente de datos (Chari et al, 2007).

Cada bloque de la capa física fue diseñado para mejorar el funcionamiento del receptor y así asegurarle al usuario una experiencia satisfactoria. El procesamiento dado a la información antes de ser enviada en símbolos OFDM se muestra en la figura 9.

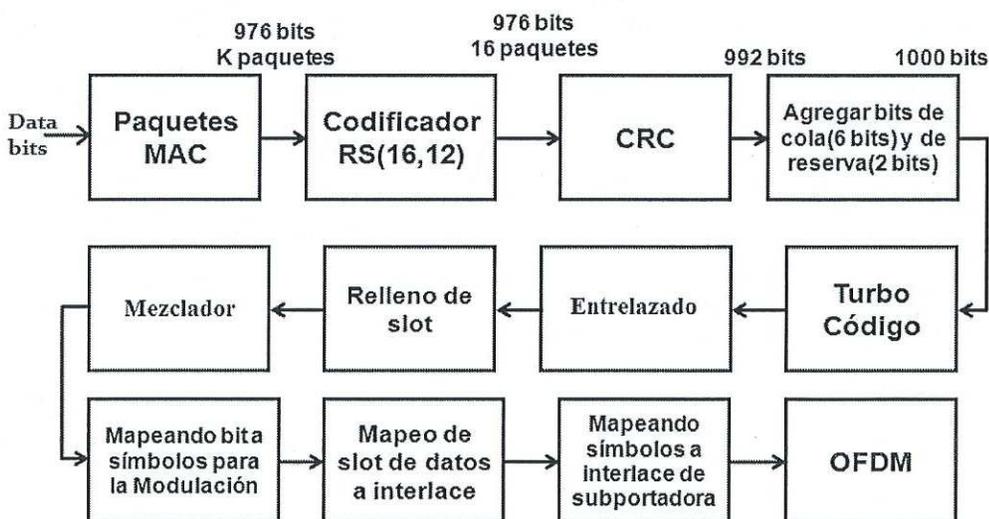


Figura 9. Generación de datos

### III.2 Proceso de Generación de datos en FLO

Por lo general, OFDM es usado en canales multitrayectoria, por lo que es necesario utilizar algún método de detección y corrección de errores para mejorar el rendimiento del sistema, razón por la cual en FLO se agregan varios bloques de codificación de canal que serán descritos a detalle a continuación:

- 1) **Paquetes de capa MAC y codificador Reed Solomon:** el flujo de bits de información multimedia es organizado como canales lógicos multicast (MLCs). Cada MLC consiste de un número de paquetes de capa MAC, los cuales son de 976 bits. Durante el proceso de codificación se colectan  $k$  paquetes de información de capa MAC. Los bits de cada paquete son agrupados en octetos. Entonces el codificador Reed Solomon es aplicado a cada columna de  $k$  octetos. Los octetos de paridad de cada código de palabras son  $(n-k)$  paquetes nuevos. Los  $k$  paquetes de capa MAC y los  $n-k$  paquetes de paridad son referidos como un código de bloque RS o de salida. Finalmente, las transmisiones de MLC en cada supertrama son siempre un entero múltiplo del código de salida.
- 2) **CRC y paquetes de capa física:** después de que se forman los códigos de bloques RS, se generan 16 bits de CRC para cada fila de un bloque RS usando el polinomio generador del estándar CRC-CCITT:

$$g(x) = x^{16} + x^{12} + x^5 + 1 \quad (7)$$

Estos bits de CRC son utilizados en el receptor para determinar si los paquetes son decodificados correctamente. Después a cada bloque se le agregan 2 bits de reserva y 6 de cola para formar paquetes de capa física de 1000 bits.

- 3) **Turbo código:** Los paquetes de capa física son turbo codificados, también llamado codificador interno. El principal propósito de este codificador interno es explotar la diversidad en frecuencia del canal. Este turbo código es el mismo que el de los estándares cdma200 y 1x-EV-DO. FLO soporta múltiples tasas de codificación (1/3, 1/2, 2/3, 1/5), (TIA, 2006).
- 4) **Entrelazador:** Los bits de salida del codificador interno son entrelazados con la finalidad de separar bits consecutivos y así evitar ráfagas de errores provocadas por desvanecimientos rápidos.
- 5) **Relleno de slots:** La unidad más pequeña de ancho de banda asignado a un MLC sobre un símbolo OFDM corresponde a un grupo de 500 símbolos de la constelación. Este grupo es llamado "slot". Hay que notar que el término "slot" se refiere a un grupo de símbolos de la constelación mientras que el término "interlace" se refiere a un grupo de subportadoras y cada slot es mapeado a un interlace.
- 6) **Mezclador:** A los bits de cada slot se les aplica una operación XOR con cada uno de los bits de salida del mezclador para colocar de manera aleatoria los bits antes de la modulación. La operación de mezclado se realiza por dos razones: (a) Minimizar los picos en la forma de onda FLO, resultando en una razón de potencia promedio pico similar a una distribución Gaussiana, y (b) permitir que los dispositivos identifiquen el canal piloto FDM de la señal deseada en los bordes entre áreas vecinas.
- 7) **Modulación de subportadoras:** Tres modos de modulación son empleados en FLO: QPSK, 16QAM y modulación por capas, donde el flujo de datos es dividido en capa base y capa mejorada, permitiendo una mejor compensación entre cobertura y tasa de datos, siendo la capa base mas robusta y se extiende hasta los bordes del

área de cobertura y todos los usuarios pueden decodificarla, mientras que la capa mejorada es decodificada en áreas donde se tiene una alta SNR.

- 8) **Mapeo de slot a interlace:** En FLO ya sea el interlace 2 ó el 6 en cada símbolo OFDM es usado como piloto FDM, alternando de un símbolo OFDM al siguiente. Como resultado sólo 7 de los 8 interlaces en cada símbolo OFDM pueden llevar símbolos de la constelación de canales lógicos multicast.
- 9) **Mapeo de símbolos modulados a subportadoras:** Después de que un slot es mapeado en uno de los 8 interlaces, los símbolos de la constelación del slot son mapeados a las subportadoras del interlace (TIA, 2006).

### III.3 Principales características de OFDM en FLO

La tecnología FLO utiliza OFDM como esquema de modulación, donde la transmisión y recepción se basa en usar 4096 subportadoras, siendo ésta la elección mas apropiada para aplicaciones multicasting, ya que el utilizar 8192 subportadoras debilita el funcionamiento del receptor a altas velocidades debido al aumento en el efecto Doppler y emplear 2048 subportadoras implica un doble encabezado debido al tamaño del prefijo cíclico necesario para soportar el mismo espaciamento entre transmisores como en un sistema con 4096 subportadoras

FLO utiliza 4000 subportadoras para datos y 96 para el intervalo de guarda, modulación de símbolos con QPSK ó 16 QAM, en un ancho de banda de 6 MHz.

El espaciamento entre subportadoras ( $\Delta f_c$ ), esta dado por:

$$\Delta f_c = \frac{5.55MHz}{4096} = 1.35498KHz$$

El espaciamiento entre subportadoras limita el funcionamiento del receptor a muy alta velocidad. El resultado es un alto efecto Doppler que provoca interferencia entre subportadoras (ICI). Con el sobre-espaciamiento entre subportadoras, se aseguran velocidades del móvil de hasta 120 km/hr para todas las opciones de constelación y tasas de codificación. Para ciertas constelaciones y tasas de codificación es posible operar a velocidad vehicular mayor.

El símbolo OFDM  $T_S'$  está compuesto de las siguientes 4 partes:

- Intervalo útil ( $T_u$ )
- Intervalo de guarda ( $T_{FGI}$ )
- 2 Intervalos de ventana ( $T_{WGI}$ )

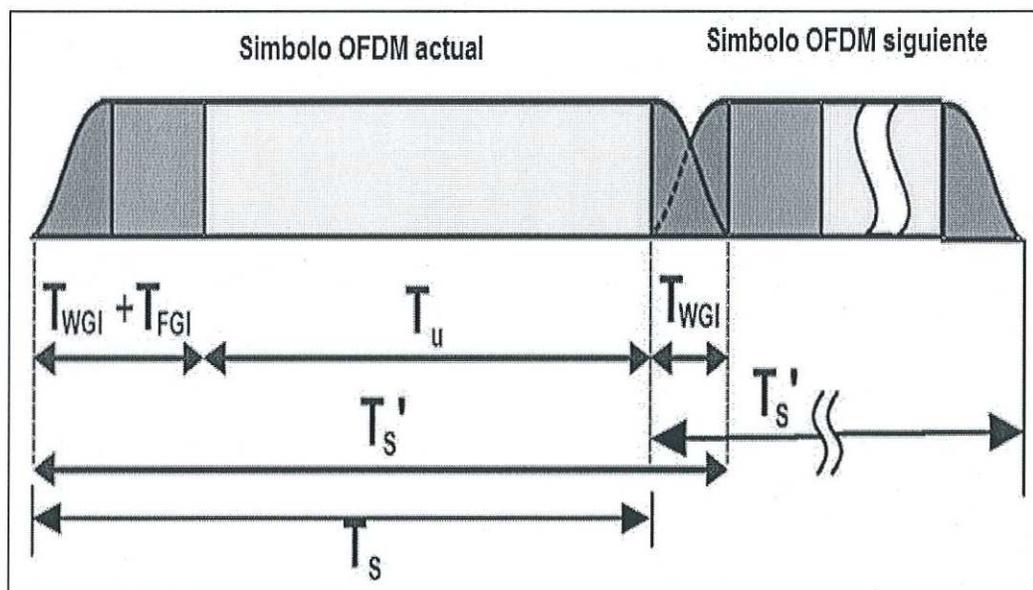


Figura 10. Símbolo OFDM

La duración del símbolo total  $T_S' = T_u + T_{FGI} + (2 + T_{WGI})$ , donde  $T_u = 4096 \text{ chips}$ ,  $T_{FGI} = 512 \text{ chips}$  y  $T_{WGI} = 17 \text{ chips}$ . Entonces  $T_S' = 4642 \text{ chips}$ .

Como se muestra en la figura 8, hay un traslape de  $T_{WGI}$  entre símbolos OFDM consecutivos. Entonces, el intervalo de símbolo OFDM tiene una duración  $T_s = T_u + T_{FGI} + T_{WGI} = 4625 \text{ chips}$ . Para FLO, el intervalo símbolo efectivo OFDM. Con 6MHz de ancho de banda es  $833.33 \dots \mu s$ .

Para FLO, el prefijo cíclico es una fracción fija de 1/8 del intervalo útil del símbolo OFDM. La selección de la duración del prefijo cíclico y la estructura de subportadora piloto es basada en parte en el estudio de cobertura en redes SFN usando transmisores de alta potencia, para la banda UHF, y también considera degradación en el receptor (debido por ejemplo a ISI/ICI).

Los principales parámetros de OFDM para un canal de RF con un ancho de banda de 6MHz son resumidos en la tabla I (Chari et al, 2007).

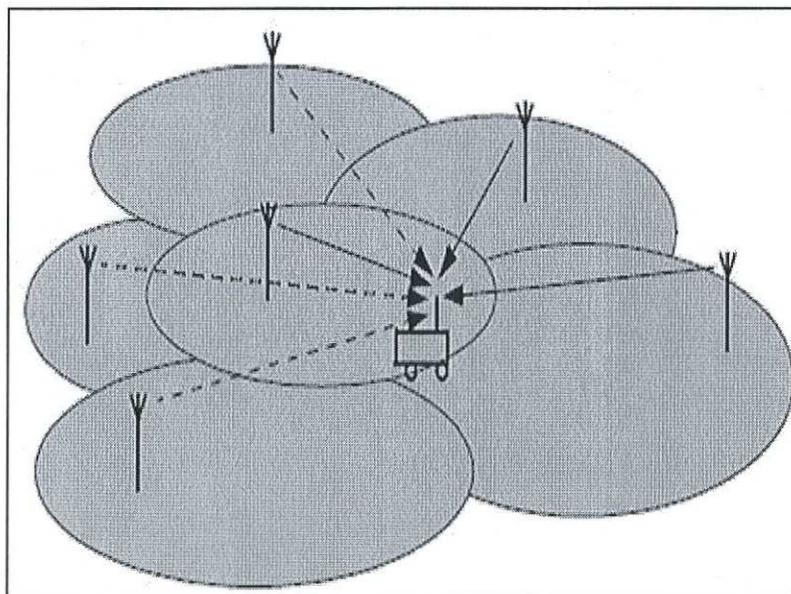
**Tabla I. Parámetros OFDM en FLO**

Parámetro	Valor
Número de subportadoras	4096
Ancho de banda FFT	5.5MHz
Espacio entre subportadoras	1.355KHz
Intervalo FFT	738.02 $\mu s$
Prefijo Cíclico	92.25 $\mu s$
Intervalo de ventana	3.06 $\mu s$
Intervalo de símbolo OFDM	833.33 $\mu s$
Duración de Chip	0.18 $\mu s$
Número de subportadoras de guarda	96
Número de subportadoras piloto	500

### III.4 Redes de Frecuencia Única (SFN)

Una red SFN está basada en un conjunto de estaciones transmisoras que trabajarán en una misma frecuencia, atendiendo una región específica. Con la llegada de la televisión digital abierta, basada en modulaciones OFDM, se hizo posible y atractivo el uso de las redes SFN ya que esa modulación es robusta ante el ruido impulsivo y multitrayectorias.

La capacidad de OFDM para superar la interferencia producida por las multitrayectorias permite distribuir un programa sobre todos los transmisores en una red radio usando la misma frecuencia. En tales redes de frecuencia única (SFN), la señal útil recibida es la superposición de todas las señales que llegan de estos transmisores que distribuyen el programa requerido (figura 11), obteniendo gran diversidad de ganancia, logrando mejor cobertura y economía de frecuencia que en redes broadcasting analógicas (Malmgren, 1996).



**Figura 11.** En una SFN las señales útiles llegan de transmisores cercanos (-), mientras transmisores localizados lejos del receptor contribuyen a la señal de interferencia (--).

### III.5 Características de una red SFN

Una red SFN puede ser modelada a través de la siguiente ecuación:

$$s(t) = \sum_{i=1}^n h_i(t) \otimes x(t) + z(t) \quad (8)$$

donde  $\otimes$  denota convolución,  $x(t)$  es la señal OFDM transmitida,  $h_i(t)$  es la respuesta al impulso del canal del transmisor  $i$ , y  $z(t)$  es el Ruido Gaussiano Blanco Aditivo (AWGN).

La respuesta al impulso del canal puede ser definida como:

$$h_i(t) = \sum_{l=1}^M h_{i,l} \delta(t - \tau_{i,l}) \quad (9)$$

donde las ganancias de cada trayecto de la señal,  $\{h_{i,l}; l=1, 2, \dots, M\}$ , son procesos Rayleigh independientes e idénticamente distribuidos.

A partir de las ecuaciones (8) y (9), se nota que la red propuesta en SFN deberá lidiar con dos tipos de retrasos: el primero debido a las reflexiones en obstáculos naturales y el segundo debido a las señales transmitidas por otras estaciones transmisoras de la red. Estos retrasos pueden causar una interferencia entre símbolos, que es generalmente administrada por el uso del intervalo de protección y estimación del canal.

Como en la mayoría de los modelos de sistemas de transmisión inalámbrica, la red SFN deberá lidiar con dos tipos de desvanecimiento: el primero llamado desvanecimiento rápido y el segundo de desvanecimiento lento. Esas degradaciones de la señal, generalmente, son modeladas en términos de funciones determinísticas describiendo las pérdidas en función de la distancia y localización de los receptores.

El desvanecimiento lento es modelado en función de los grandes obstáculos naturales de terreno y el desvanecimiento rápido es modelado por el esparcimiento de la señal en las vecindades del receptor. Otros importantes parámetros son la posición y el direccionamiento de las antenas, la potencia efectiva irradiada y las características del terreno (Arthur et al, 2007).

## **III.6 Ventajas y desventajas de redes SFN**

### **III.6.1 Ventajas de redes SFN**

Una alta eficiencia espectral se considera la mejor ventaja en las redes SFN comparada con las redes MFN (Multi Frequency Network). La eficiencia espectral es muy importante en ambientes en donde el espectro es escaso, tanto en la fase introductoria de servicio digital cuando el espectro es ocupado por servicios analógicos y también a largo plazo en que una gran cantidad de programas ofrecidos harán los servicios de broadcasting más atractivos para los clientes.

- En SFN la señal recibida es una superposición de las señales que vienen de varios transmisores. La variación de la potencia de campo total es más baja, puesto que uno de los transmisores se sombrea, mientras que los otros siguen siendo admisibles. Esto da lugar a una gran probabilidad de localización comparada a la del caso de un solo transmisor. Este fenómeno es usualmente referido como ganancia de red o diversidad de ganancia.
- Como resultado de la ganancia de red, la red SFN puede operar a baja potencia y la distribución de la potencia de campo sobre el área total de servicio es más homogénea comparada a MFNs.

- La SFN permite la instalación de transmisores “gap-filling” en sitios donde se obtenga una mala calidad de recepción, sin usar frecuencias extras.
- Incrementa la robustez usando SFNs densas en las cuales la falta de un solo transmisor no de lugar a la interrupción de la cobertura para la red entera.

### **III.6.2 Desventajas de redes SFN**

- La separación de la red no es posible (la red no puede emitir programas diferentes), ya que si se transmiten contenidos de programas ó datos distintos se produce interferencia.
- La sincronización entre los transmisores de la red SFN es necesaria: las emisiones de la señal deben ocurrir en el mismo tiempo, o con exacto control del retardo de cada transmisor.
- Se necesita la sincronización exacta de la frecuencia en el transmisor y en el receptor, porque los errores generan las pérdidas de ortogonalidad de la frecuencia para las señales recibidas (Ligeti, 1999).

### **III.7 Planificación de redes de frecuencia única**

Una parte importante de la planificación de cualquier red de comunicaciones es planear la cobertura: para asegurar calidad suficiente de la señal requerida por el nuevo servicio y que esté disponible en toda el área donde se ofrece el servicio. Planear la cobertura de la red involucra determinar el número apropiado de transmisores, colocación exacta, niveles de potencia radiada, altura de las antenas, patrones de antena, polarización, frecuencia y parámetros dependientes del servicio, todo para satisfacer la cobertura requerida.

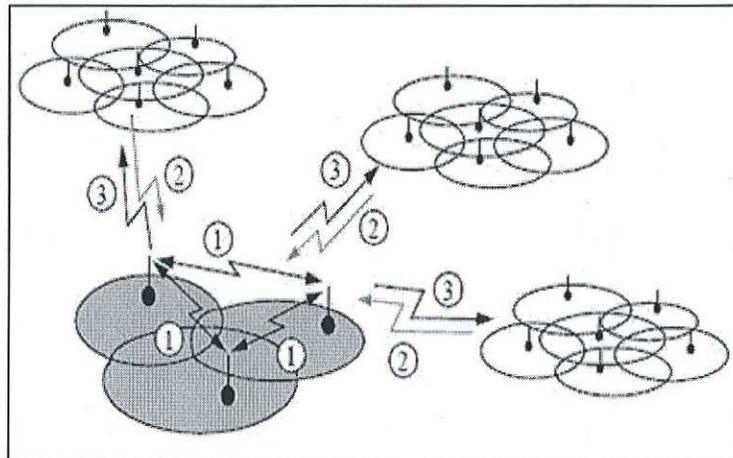
En los primeros días de la comunicación inalámbrica la planeación de cobertura se basaba en simples reglas tales como "alta potencia irradiada" (para reducir al mínimo el número de transmisores y así reducir el costo de la infraestructura), y en aquella época las redes de radio nacional entera que difundían fueron construidas con un número muy pequeño de transmisores, operando con una potencia irradiada extremadamente alta.

Tal "competencia de energía" dio lugar a la saturación rápida del espectro de radio disponible, conduciendo a una degradación natural innecesaria del ambiente inalámbrico y a pérdidas de la inversión de capital.

Más que limitación por el ruido, la cobertura de las redes llega a ser limitada por la interferencia, y llegó a ser necesario aplicar métodos sofisticados de planeación de red junto con la coordinación internacional.

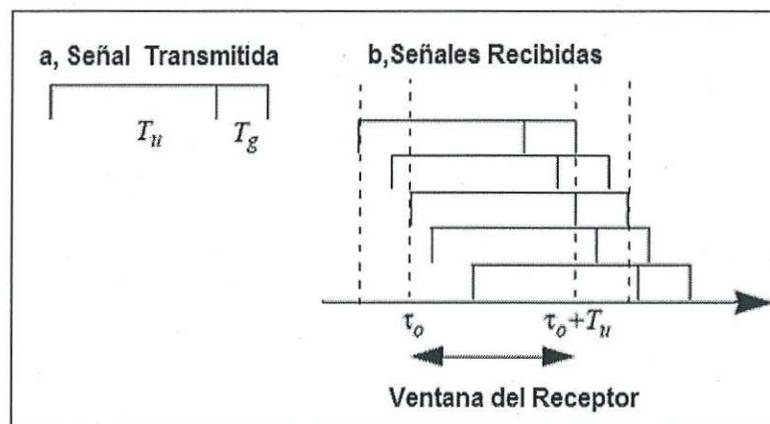
En una red SFN múltiples copias de la señal llegan a la antena receptora con retardos diferentes. Si la dispersión en el retardo de la señal es mas pequeña que el intervalo de guarda, no se presenta la interferencia entre símbolos y la señal contribuye totalmente a la señal deseada. Señales de transmisores colocados muy lejos del receptor pueden causar interferencia entre símbolos y la señal interfiere por el excesivo retardo. Estas señales que llegan contribuyen parcialmente tanto a la señal deseada como a la de interferencia. Este fenómeno es llamado auto-interferencia. Por lo tanto en una red SFN no solamente el ruido, sino también las señales retardadas fuera del intervalo de guarda tienen un importante impacto en la cobertura alcanzable.

Hay tres tipos de interferencias encontradas en la red que tienen que mantenerse en niveles suficientemente bajos cuando se planea una red SFN: (1) interferencia interna: interferencia entre los transmisores de la red; (2) Interferencia externa: viene de otras redes que operan en la misma banda de frecuencia; (3) Interferencia generada: la interferencia causada por la red a otras redes (figura 12) (Ligeti, 1999).



**Figura 12. Los niveles permitidos de los tres tipos de interferencia son estrictamente regulados**

En sistemas de OFDM la dispersión en el retardo extremo es controlada usando un símbolo transmitido más largo que el intervalo real observado por el receptor. La señal con intervalo  $T_s$  consiste de una parte del símbolo útil con intervalo  $T_u$  y un intervalo de guarda  $T_g$  (figura 11). La longitud del intervalo de guarda requerido es determinada por el máximo retardo y los requerimientos de cobertura (Ligeti, 1999).



**Figura 13.a) Símbolo transmitido  $T_s$ . El símbolo está compuesto del intervalo útil  $T_u$  y el intervalo de guarda  $T_g$ . b) Señales retardadas por las multitrayectorias en comparación con la ventana  $T_u$  usada para detección en el receptor.**

### Descripción del Modelo de Simulación

---

#### IV.1 Introducción

Con la finalidad de determinar el área de cobertura de una red SFN y evaluar el funcionamiento del esquema de modulación OFDM, el cual es empleado por el sistema MediaFLO para la transmisión en broadcast de flujo multimedia a dispositivos móviles, se utilizó SIMULINK, paquete de software que se ejecuta acompañando a MATLAB para modelar, simular y analizar sistemas dinámicos, como los mostrados en las figuras 14 y 15, donde cada bloque del transmisor y receptor cumplen con las características de modulación establecidas en la capa física de la interfaz de aire FLO del sistema MediaFLO.

El sistema MediaFLO consiste de transmisores que operan en una red SFN. En este tipo de redes los transmisores son sincronizados en tiempo y frecuencia para enviar formas de onda idénticas a muy alta potencia. Por lo cual se espera que la señal recorra grandes distancias antes de llegar al receptor, lo que implica grandes retardos de propagación. Por lo tanto, para determinar el área de cobertura de las redes SFN se debe considerar la interferencia interna provocada por el retardo excesivo, el cual limita el área de cobertura de la misma.

Para obtener el área de cobertura de la red SFN es fundamental determinar el alcance de un solo transmisor. Por lo tanto es importante simular la transmisión y recepción de símbolos OFDM considerando los efectos provocados por el canal radio como son: la dispersión en el retardo, atenuación, desvanecimientos Rayleigh con multitrayectorias y ruido AWGN, con la finalidad de establecer la separación idónea entre los transmisores de la red.

## IV.2 Modelo de simulación de un sistema OFDM

Primero se simuló el modelo a bloques de la figura 14, para determinar el alcance de un transmisor, considerando que la señal solo se ve afectada por el canal AWGN (modelo de canal casi ideal) y la atenuación debida a la distancia entre el transmisor y el receptor. Además de observar su comportamiento para diferentes tasas de transmisión que van de los 200 a 300 kbps y diferentes relación  $E_s/N_0$ .

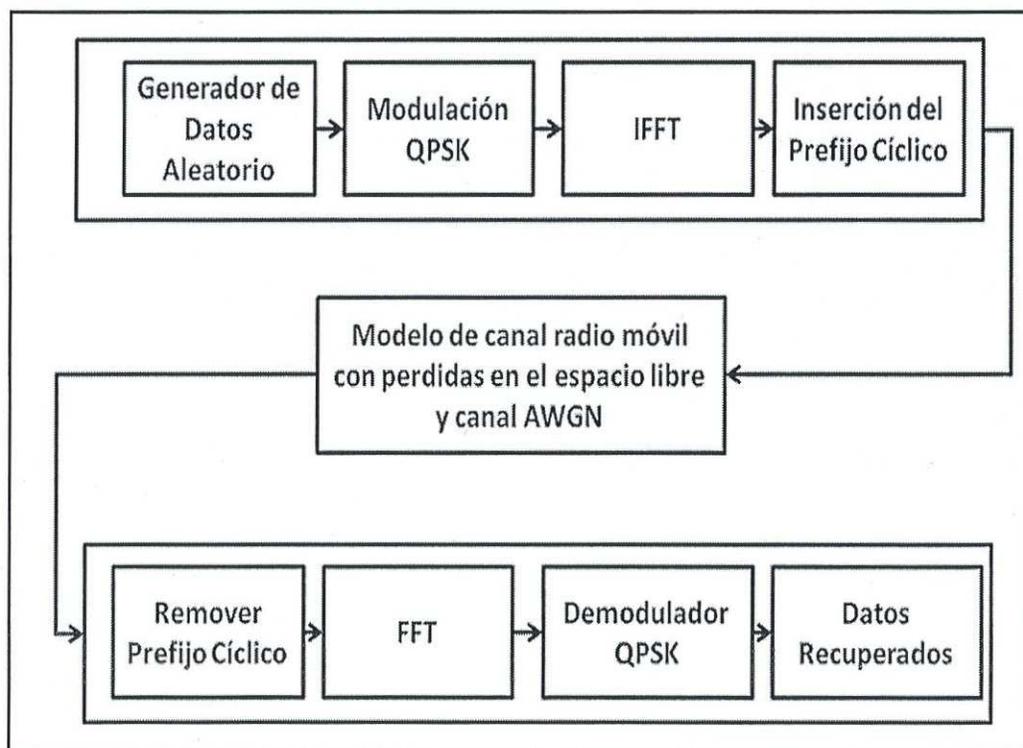


Figura 14. Diagrama a bloques de un sistema OFDM

Posteriormente se implementó el modelo a bloques de la figura 15, donde se emplea un canal más real, agregando multitrayectorias y desvanecimientos Rayleigh al modelo de canal que se tenía, además de considerar la movilidad en el receptor. Sin embargo, para contrarrestar los efectos provocados por las multitrayectorias y desvanecimientos se agregaron bloques de codificación y estimación de canal.

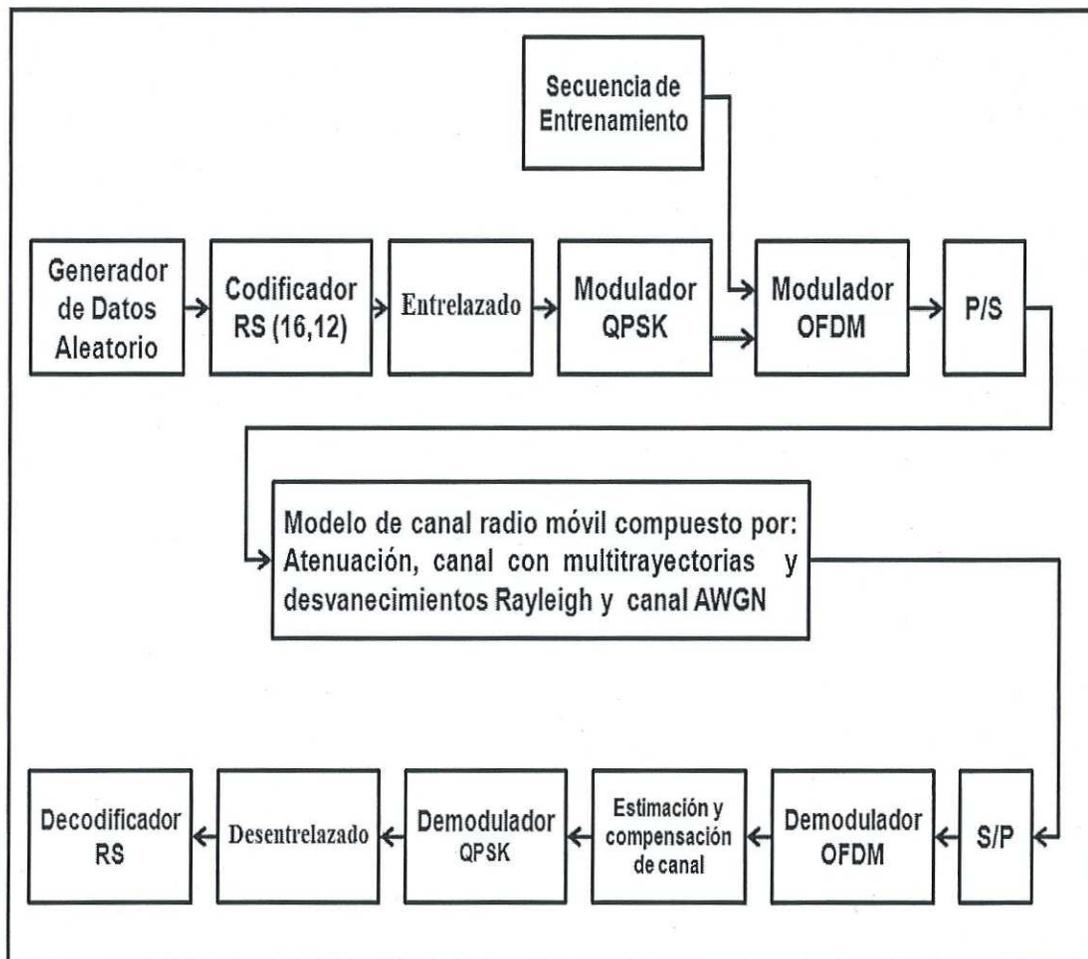


Figura 15. Diagrama a bloques de un sistema COFDM

## IV.3 Descripción de los bloques del modelo de simulación

### IV.3.1 Generador de datos aleatorio

El generador de datos aleatorios es usado para crear una serie de datos binarios que se agrupan para formar valores entre 0 y 3 que son los posibles valores que se pueden obtener al agrupar dos bits, los cuales son necesarios para la modulación QPSK.

### IV.3.2 Codificador Reed Solomon

Los códigos Reed Solomon son códigos de bloques utilizados para la detección y corrección de errores, protegen la información contra errores en los datos transmitidos sobre un canal de comunicaciones. Este tipo de códigos pertenece a la categoría FEC (Forward Error Correction), es decir, corrige los datos alterados en el receptor y para ello se agregan bits de redundancia que permitan la recuperación.

Emplean la matemática de los campos de Galois( $2^m$ ). Se especifican como RS(n, k) con símbolos de m bits. Es decir, en el transmisor, el codificador toma k símbolos de los datos del usuario y les agrega n-k símbolos de redundancia. Esto se hace mediante un algoritmo interactivo y empleando operaciones con polinomio generador. En el receptor, el decodificador puede detectar y corregir  $t = \frac{(n-k)}{2}$  símbolos erróneos.

El codificador acepta un mensaje de k bits y genera una palabra código de n bits ( $n > k$ ). La diferencia ( $n - k$ ) se conoce como redundancia. Otros parámetros que caracterizan a un código son su velocidad ( $R_c = k/n$ ), su capacidad detectora y correctora.

Para la simulación se utilizó un código Reed Solomon recortado RS (16, 12), que tiene la capacidad de detectar y corregir dos bits por cada símbolo OFDM enviado.

### IV.3.3 Entrelazado

El entrelazado es un método que permite que los bits transmitidos sean afectados de manera independiente por el desvanecimiento. Los bits que son relacionados por un código no deberían ser transmitidos en posiciones (tiempo o frecuencia) muy cercanas del canal, puesto que en el caso de un canal multitrayectoria, por lo general se producen errores en forma de ráfagas, que afectan a varios bits seguidos, lo cual dificulta el trabajo de los códigos detectores y correctores de errores porque estos permiten detectar y corregir una cantidad limitada de bits erróneos.

En el caso de códigos de bloque, los bits que son relacionados por el código (bits que dependen unos de otros de manera consecutiva y que son severamente afectados por errores de ráfaga) corresponden a una misma palabra de código. Así, para evitar transmitir juntos estos bits relacionados, se puede usar una separación en la dimensión física del tiempo, lo cual se conoce como entrelazado en el tiempo. Al usar este tipo de entrelazado, se introduce un retardo en la decodificación, puesto que es necesario esperar los bits relacionados.

En el caso de OFDM, existe además la diversidad en frecuencia. En este caso se puede usar entrelazado en frecuencia, donde los bits consecutivos son puestos en distintas subportadoras no-correlacionadas, de tal forma que estos bits experimenten atenuaciones independientes.

En el estándar se maneja el entrelazado en bloques el cual se logra mediante una matriz de  $L$  líneas (profundidad) y  $n$  columnas (número de símbolos de una palabra código). Donde los datos son escritos en columnas y leídos en filas

### **IV.3.4 Modulación de datos**

Los datos a ser transmitidos en cada portadora son modulados usando PSK (Phase Shift Keying), donde la información está contenida en el ángulo de fase. Para QPSK los ángulos de fase utilizados son 0, 90, 180 y 270 grados. El usar PSK produce una amplitud constante de la señal y reduce problemas con las variaciones en amplitud debidas a desvanecimientos.

### **IV.3.5 Estimación de canal con secuencia de entrenamiento**

Los estimadores de canal usualmente necesitan de un tipo de información piloto como punto de referencia. Un canal con desvanecimientos requiere de constante seguimiento, esta información piloto tiene que ser transmitida de manera continua.

En OFDM se transmite una secuencia de entrenamiento conocida para contrarrestar los efectos provocados por las multitrayectorias y la movilidad del receptor; de esta forma se estima la respuesta al impulso del canal antes de la transmisión de datos en sistemas de comunicación digital. Las secuencias de entrenamiento son periódicas o aperiódicas. En cualquier caso, el espectro de energía de la secuencia de entrenamiento está aproximadamente sobre el ancho de banda de la transmisión

La secuencia de entrenamiento sugerida para la valoración del canal en un sistema OFDM es una secuencia binaria pseudoaleatoria con N muestras. La secuencia de entrenamiento se hace periódica repitiendo N muestras o agregando un prefijo cíclico.

Ya que la tesis no tiene como objetivo evaluar métodos de estimación canal, se ajustaron los bloques de estimación de canal y secuencia de entrenamiento de otros modelos (Prastomo, 2003) de acuerdo a los requerimientos del sistema a simular.

## **IV.3.6 Modulación OFDM**

### **IV.3.6.1 Transformada inversa rápida de Fourier (IFFT)**

La IFFT se utiliza para encontrar la forma de onda de la señal en el dominio del tiempo, para el modelo se considera que el tamaño de la IFFT es de 4096.

### **IV.3.6.2 Prefijo cíclico**

Es una extensión cíclica de la última parte del símbolo OFDM a ser transmitido, en FLO la longitud es fija y consiste de un 1/8 del símbolo, equivalente a 512 subportadoras.

## **IV.3.7 Canal**

Los bloques de canal representan el medio de transmisión del sistema, que en este caso es el aire; sus características de atenuación por propagación, desvanecimientos Rayleigh y ruido AWGN, se introducen al simulador para calcular sus efectos sobre la señal transmitida.

## **IV.3.8 Receptor**

En el receptor básicamente se realiza la operación inversa que en el transmisor. El prefijo cíclico es removido y se aplica la FFT a cada símbolo para encontrar el espectro transmitido originalmente. Se evalúa el ángulo de fase de cada subportadora y se convierte al valor del dato por el demodulador del receptor y finalmente al proceso de decodificación para detección y corrección de errores.

#### IV.4 Modelo de red de frecuencia única (SFN)

Con la realización de estas simulaciones se pretende evaluar el comportamiento del receptor al recibir dos o más señales idénticas procedentes de dos ó más transmisores de una red de frecuencia única (SFN). Dependiendo del retardo con el que estas señales lleguen al receptor se sumaran de manera constructiva o destructiva, si el retado excede el intervalo de guarda causara el fenómeno conocido como interferencia interna. Por lo tanto en una red SFN no solamente el ruido del canal sino también las señales retardadas fuera del intervalo de guarda son un factor limitante en el área de cobertura alcanzable.

Como se puede observar en la figura 16, se tienen varios transmisores que enviaran formas de onda idénticas simultáneamente, estas señales se verán afectadas por el canal de forma diferente dependiendo de la trayectoria y llegarán al receptor con diferentes retardos de propagación. Para evaluar la interferencia interna de la red, se agrega un filtro coseno elevado en el transmisor y el receptor con la finalidad de demodular la señal de interés con la mínima interferencia posible.

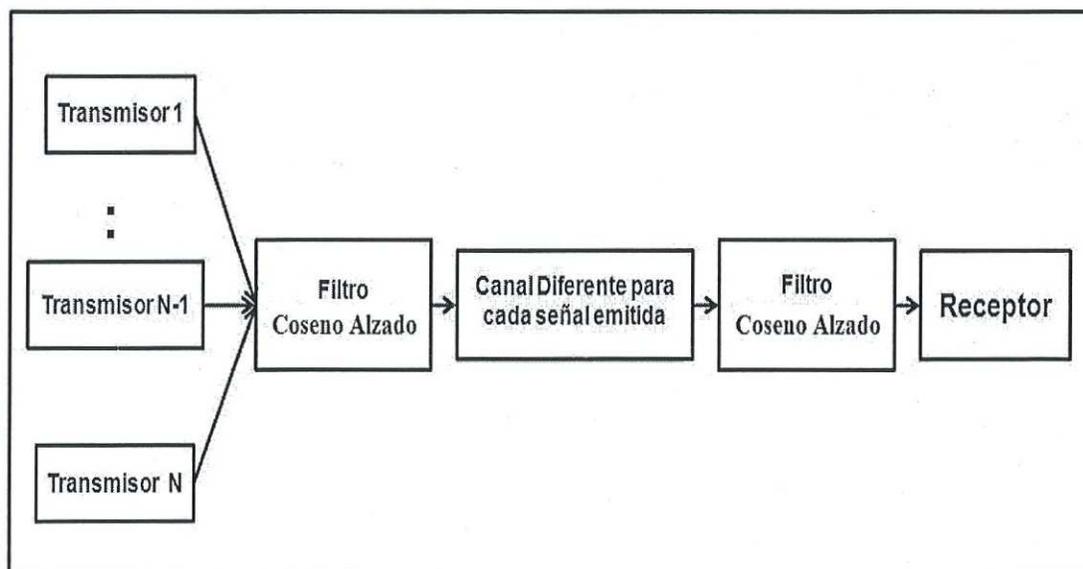


Figura 16. Modelo de red de frecuencia única

#### IV.4.1 Filtro coseno-elevado

Al transmitir un pulso de determinada duración a través de un canal limitado en ancho de banda se produce un fenómeno conocido como interferencia entre símbolos (ISI). Un filtro coseno elevado es un filtro FIR (Finite Impulse Response, respuesta al impulso finita), utilizado frecuentemente en sistemas de telecomunicaciones debido a que es capaz de reducir al mínimo la interferencia entre símbolos (ISI).

Su descripción en el dominio de la frecuencia está dado por:

$$|H(f)| \begin{cases} T, & 0 \leq |f| \leq \frac{1-\beta}{2T} \\ \frac{T}{2} \left[ 1 + \cos \left( \frac{\pi T}{\beta} \left[ |f| - \frac{1-\beta}{2T} \right] \right) \right], & \frac{1-\beta}{2T} < |f| \leq \frac{1+\beta}{2T} \\ 0, & \frac{1+\beta}{2T} \leq |f| \end{cases} \quad (10)$$

donde  $\beta$  es el factor de roll off, el cual determina la pendiente del filtro y puede tomar valores en 0 y 1, siendo 0.2 es valor más común para telecomunicaciones, T es el periodo de símbolo y f es la frecuencia de corte (Mathworks, Inc.).

Su respuesta al impulso es la mostrada en la siguiente ecuación:

$$h(t) = \frac{\text{sen}(\pi t/T)}{(\pi t/T)} \cdot \frac{\cos(\beta \pi t/T)}{1 - 4\beta^2 t^2/T^2} \quad (11)$$

## IV.5 Parámetros de simulación

En la tabla II se muestran los parámetros de simulación para determinar el área de cobertura de una red de frecuencia única. Estos parámetros fueron tomados del estándar Forward Link Only (TIA, 2006), con excepción del número de transmisores que se utilizaron para caracterizar el comportamiento de la red.

**Tabla II. Parámetros de simulación**

Parámetro	Valor
Número de subportadoras	4096
Ancho de banda FFT	5.5MHz
Espacio entre subportadoras	1.355KHz
Intervalo FFT	738.02 $\mu$ s
Prefijo Cíclico ( # subportadoras)	512
Duración de símbolo OFDM	833.33 $\mu$ s
Modulación	QPSK
Codificador RS	RS(16,12)
Velocidad del móvil	3km/hr
Frecuencia Doppler	2.1 Hz
Frecuencia portadora	700 MHz
ERP	50 kW
Velocidad de transmisión	200-300 kbs
Es/No	25-35 dB
No. de transmisores	1-7
Distancia entre Tx y Rx	1-20 km

### Simulación y Análisis de Resultados

---

#### V.1 Introducción

Este capítulo está dedicado a mostrar la simulación y resultados de una red de frecuencia única basada en la modulación OFDM, utilizando las especificaciones del estándar FLO. El objetivo de esta simulación es determinar el área de cobertura de este tipo de red, y para ello se observará como se afecta la tasa de bit erróneo (BER) al considerar la atenuación por propagación, el nivel de ruido blanco presente en el canal y los efectos de las multitrayectorias.

Se plantean varios escenarios de simulación, el primero de ellos consiste en evaluar como afectan al BER el ruido blanco gaussiano, la atenuación de la señal y la velocidad de transmisión. Para lograr esto se modifica el nivel del ruido que el canal introduce a la señal haciendo cambios en la relación  $E_s/N_0$  (de 25dB a 35dB), la distancia entre el transmisor y el receptor, y finalmente la tasa de transmisión. En el segundo escenario se agrega el efecto de las multitrayectorias al canal radio para observar el comportamiento del sistema; en estas pruebas se varía el retardo y la ganancia de las multitrayectorias manteniendo constante la tasa de transmisión y la velocidad del receptor. En el tercer escenario se determina el área de cobertura de una red de frecuencia única con 2, 3 y 7 transmisores considerando la interferencia interna y la ganancia de ésta.

En (Chari et al, 2007 y Qualcomm, 2007) evaluaron el funcionamiento de la capa física de FLO usando la tasa de paquete erróneo (PER) como criterio primario. Para propósitos de cobertura ellos tomaron como aceptable un PER del 1% asumiendo que los decodificadores de audio y video cuentan con técnicas de eliminación de errores avanzadas, que permiten funcionar a altas tasas de PER.

Para esta tesis, en el análisis de resultados de las simulaciones y para determinar el alcance de los transmisores que componen la red, se consideró como aceptable un BER de  $1 \times 10^{-3}$ , tal como en (Chari et al, 2007 y Qualcomm, 2007).

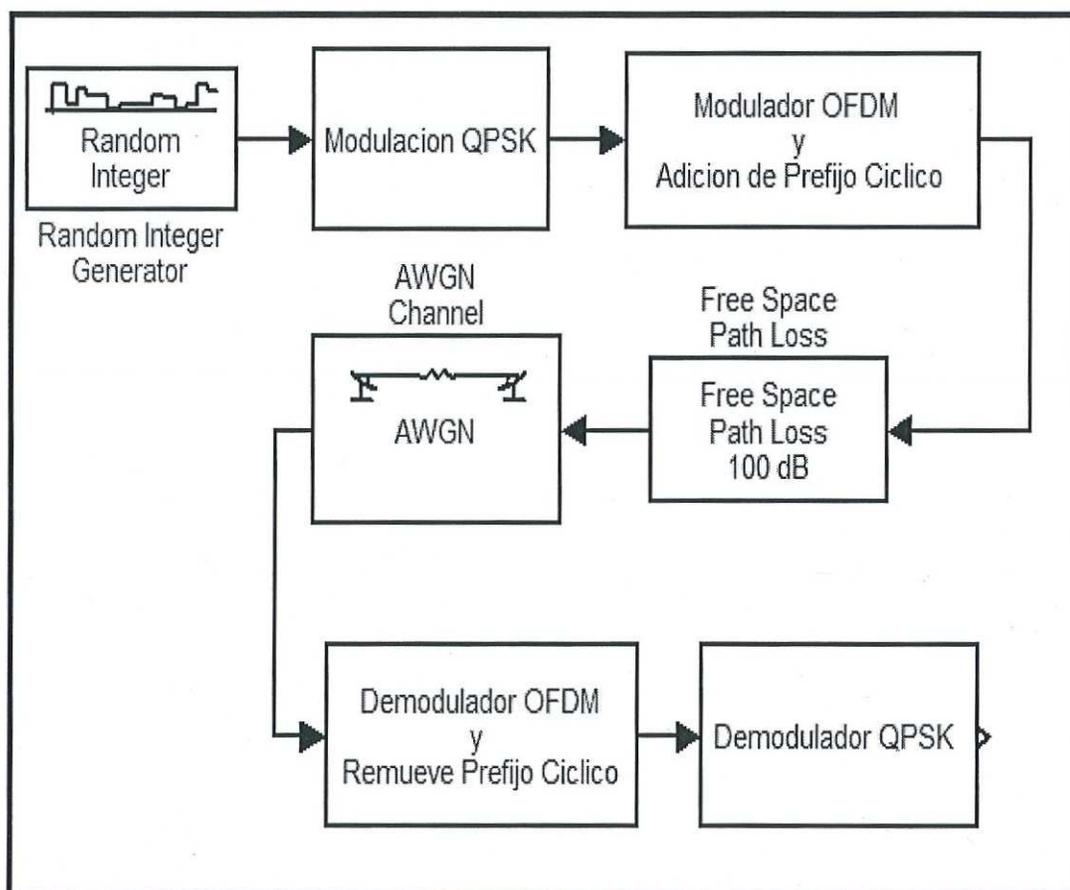
Esta consideración se hace ya que en la simulación no se implementan diversas etapas de corrección de errores (turbo código, mezclado de bits, mezclado de ranuras.etc.) del estándar FLO. Siendo el turbo código el bloque mas importante ya que permite disminuir el BER (para alcanzar un nivel aceptable en la transmisión de video móvil que es de  $1 \times 10^{-6}$ ), como se puede observar en (Worm et al, 2000) donde lo utilizan con una tasa de codificación  $\frac{1}{2}$  para reducir el BER, con una relación Es/No considerablemente pequeña en un canal AWGN y con desvanecimiento Rayleigh.

## **V.2 Escenarios de simulación**

### **V.2.1 Primer escenario: Efectos del ruido blanco, atenuación por propagación y velocidad de transmisión en un sistema OFDM**

Las simulaciones tienen la finalidad de observar el impacto que tiene la velocidad de transmisión en el alcance de la señal transmitida cuando esta se ve afectada por un modelo de canal casi ideal (Ruido AWGN y atenuación por propagación). Para establecer la distancia a la cual la señal aún se recibe con la calidad suficiente, se tomó como referencia la figura de mérito del BER con un umbral de  $1 \times 10^{-3}$ , como se explicó anteriormente.

En la figura 17 se muestra el diagrama a bloques en Simulink correspondiente al sistema simulado, se observa que en la parte superior se encuentran los bloques que conforman al transmisor (generados de datos, modulador QPSK y modulador OFDM), en el medio se encuentran los bloques pertenecientes al canal (pérdidas por propagación y ruido AWGN), y en la parte inferior se encuentran los bloques utilizados en el receptor.

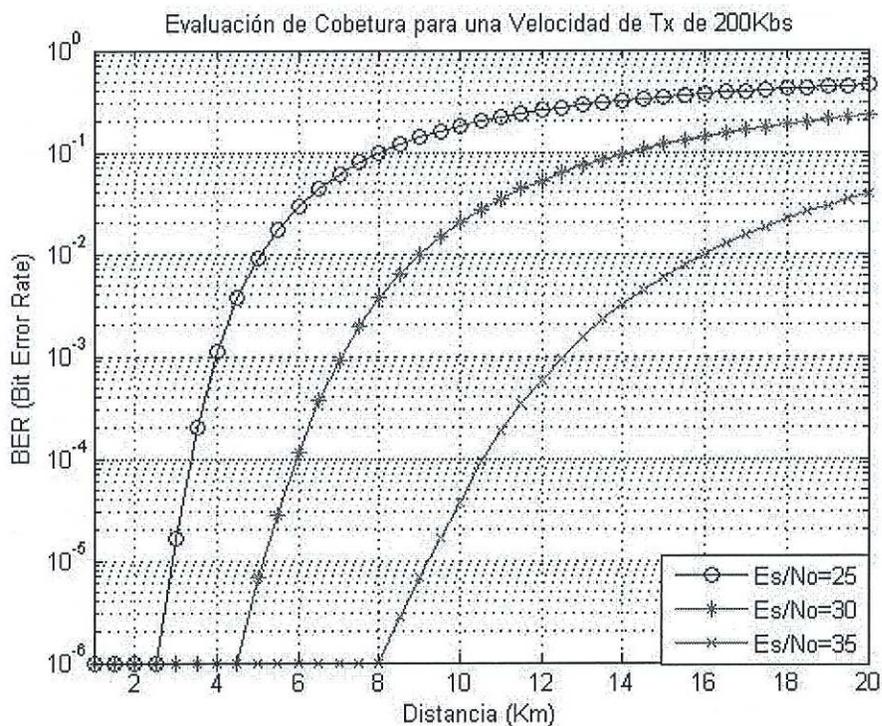


**Figura 17. Modelo en Simulink de un sistema OFDM**

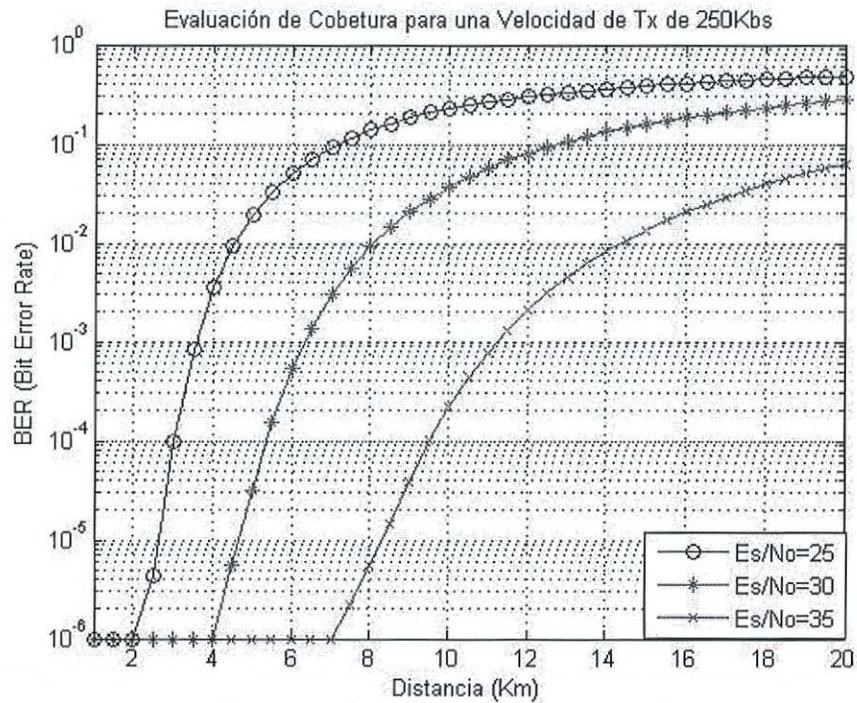
En las figuras 18, 19 y 20 se muestra como el BER aumenta conforme la distancia entre el transmisor y el receptor aumenta, a la vez que también se observa que entre mayor sea la relación  $E_s/N_0$  la señal transmitida tiene mayor alcance.

Al incrementar la velocidad de transmisión el receptor tiene menos tiempo para procesar cada uno de los símbolos recibidos, que además son de menor duración, causando la interferencia entre símbolos que a su vez resulta en un mayor número de bits erróneos, alcanzando el BER su umbral mínimo a una distancia menor (aproximadamente 1 km), como se puede observar en las figuras 19 y 20.

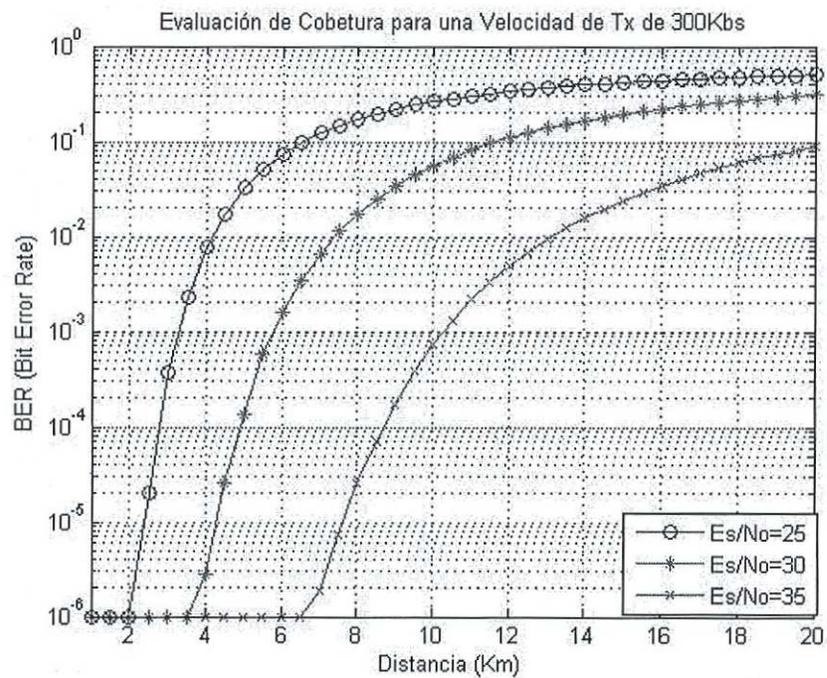
Analizando las figuras 18, 19 y 20 se estableció que en los escenarios de simulación subsecuentes se utilizaría la velocidad de transmisión de 250 kbps, ya que con esta se obtiene un alcance del transmisor de 11.2 km, que es muy cercano a la distancia promedio de las tres velocidades de transmisión simuladas que cumplen con el desempeño requerido.



**Figura 18. BER vs. Distancia para diferentes Es/No a 200 kbps**



**Figura 19. BER vs. Distancia para diferentes Es/No a 250 kbps**



**Figura 20. BER vs. Distancia para diferentes Es/No a 300 kbps**

## V.2.2 Segundo escenario: Efectos del ruido blanco, atenuación por propagación, multitrayectorias y movilidad del receptor en un sistema OFDM

Como se puede observar en la figura 21, el modelo en Simulink considera varios bloques de codificación de canal, cuenta con un código Reed Solomon recortado (16,12), además de estimación de canal con secuencia de entrenamiento para contrarrestar los efectos de las multitrayectorias y atenuación que sufre la señal antes de llegar al receptor, con la finalidad de que la señal recibida sea decodificada con el menor número de errores posible, de manera que se pueda mantener el BER por debajo del umbral requerido.

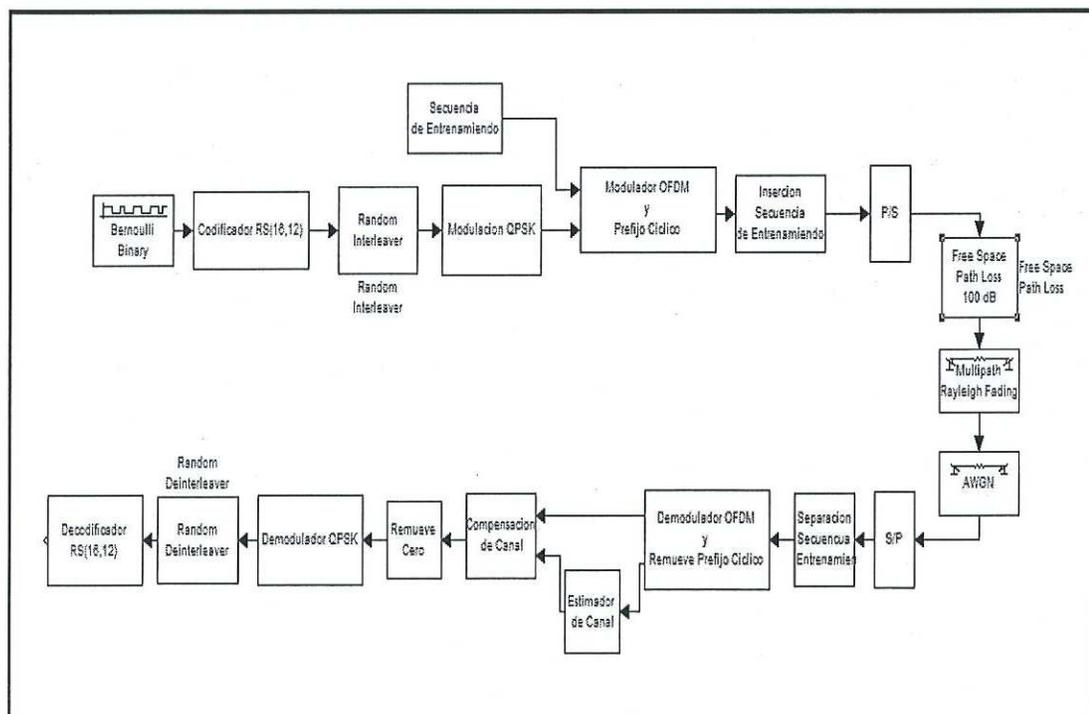
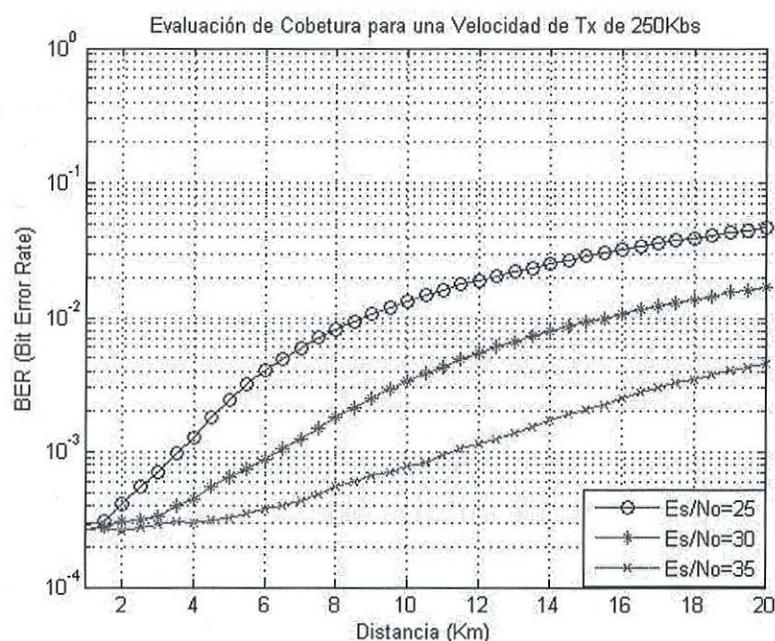


Figura 21. Modelo en Simulink de un sistema OFDM, con un canal con multitrayectorias

La utilidad de los bloques de codificación y estimación de canal en las simulaciones consiste en estimar y compensar la respuesta impulsiva del canal para eliminar los errores provocados por este, buscando tener resultados similares o mejores a los observados en el escenario anterior, donde se tenía un modelo de canal casi ideal.

Como se puede observar en la figura 22, la eficiencia de los bloques de codificación y estimación de canal queda comprobada, ya que con una relación  $E_s/N_0$  de 35dB a 250kbs, el transmisor tiene un alcance de 11.5 km, es decir, 300 m más que en el escenario anterior con los mismos parámetros de simulación, pero tomando en cuenta que ahora se están agregando los efectos de las multitrayectorias.



**Figura 22. BER vs. Distancia para diferentes  $E_s/N_0$  a 250 kbs, canal con multitrayectorias**

Estos resultados son de gran importancia para determinar el impacto que tienen la interferencia y ganancia interna de la red en el área de cobertura alcanzable, ya que a partir de ellos se estableció la distancia máxima a la que deben colocarse los transmisores dentro de la red SFN para iniciar las simulaciones del tercer escenario.

## V.2.3 Tercer escenario: Cobertura en una red de frecuencia única.

### V.2.3.1 Cálculo de cobertura en una red SFN con dos transmisores

Para determinar el área de cobertura de una red SFN se debe considerar la interferencia provocada por los transmisores que la componen. En la figura 23 se muestra el modelo en Simulink de una red SFN compuesta por 2 transmisores perfectamente sincronizados, que difunden señales con 50 kW de potencia (Chari et al, 2007 y Qualcomm, 2007). El receptor ve estas señales como si fueran de un mismo transmisor, sólo que con diferentes retardos de propagación.

Las señales emitidas por estos transmisores se ven afectadas por el canal de forma diferente antes de llegar al recetor, siendo el retardo de las multitrayectorias uno de los principales limitantes en el área de cobertura alcanzable.

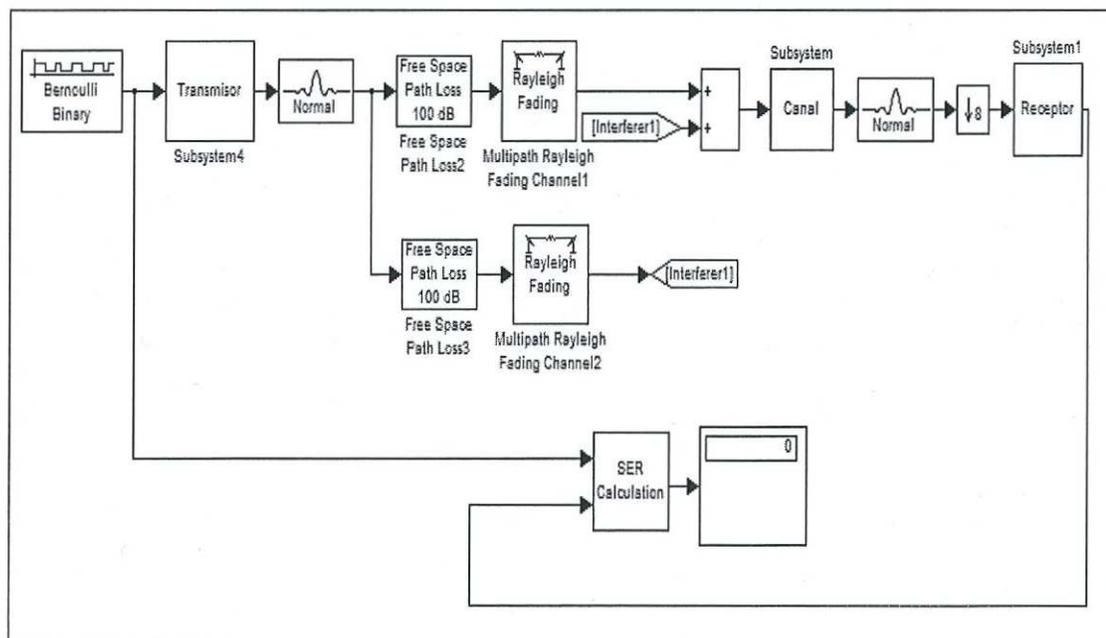


Figura 23. Modelo en Simulink para evaluar interferencia entre de 2 transmisores

La Figura 24 muestra el punto más importante a evaluar en una red compuesta por dos transmisores, ya que la señal resultante es una combinación de dos señales que se encuentran a la máxima distancia, donde aún se debe satisfacer un BER mínimo de  $1 \times 10^{-3}$ .

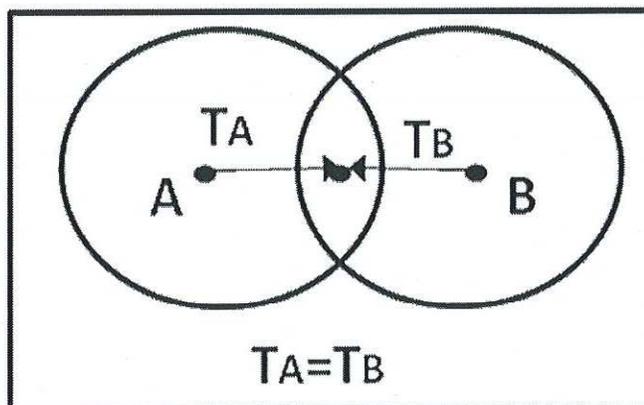


Figura 24. Puntos importantes a evaluar en una red SFN

Como se puede observar en la tabla III, al tener dos transmisores en la red SFN el alcance de cada uno de ellos se limita a 7.5 km, que es donde se cumple el requerimiento de un BER de  $1 \times 10^{-3}$ . Al tener sólo dos transmisores no se presenta el fenómeno de ganancia interna de red, por lo tanto, los transmisores deben colocarse a una distancia máxima de 15 km, de manera que se minimice la interferencia y se tenga toda el área de cobertura cubierta.

Tabla III. BER para una red SFN con 2 transmisores

Distancia (km) entre Tx y Rx	BER Para un transmisor	BER Para 2 transmisores
11.5	$1 \times 10^{-3}$	$1.6 \times 10^{-3}$
11	$9.5 \times 10^{-4}$	$1.5 \times 10^{-3}$
10	$7.82 \times 10^{-4}$	$1.3 \times 10^{-3}$
9	$6.68 \times 10^{-4}$	$1.2 \times 10^{-3}$
8	$5.58 \times 10^{-4}$	$1.1 \times 10^{-3}$
7.5	$4.38 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-3}$

### V.2.3.1 Cálculo de cobertura en una red SFN con tres transmisores

En la figura 25 se muestra el modelo en Simulink utilizado para evaluar la interferencia entre 3 transmisores de una red SFN. La atenuación de la señal depende de la distancia a la que se encuentra el receptor de cada uno de los transmisores.

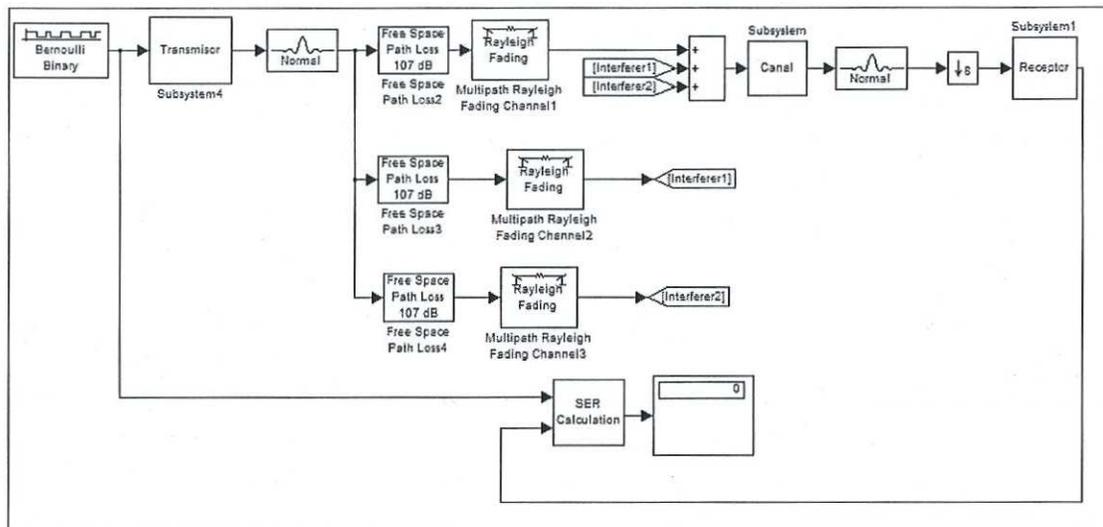


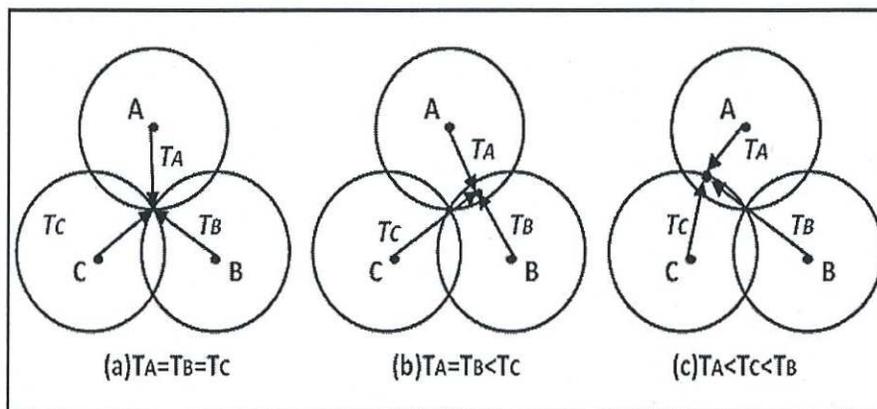
Figura 25. Modelo en Simulink para evaluar interferencia

De acuerdo a (Arthur, 2007) los principales puntos para evaluar la interferencia interna de una red de frecuencia única son los mostrados en las figura 26, donde la señal resultante es una combinación de tres señales, una de cada transmisor. La señal proveniente de cada transmisor llega a la antena del receptor con una dispersión temporal, con características dadas por el canal de transmisión recorrido por la señal.

En la Figura 26(a), las tres señales llegan con amplitudes semejantes y el retraso entre ellos es nulo o muy pequeño situación conocida como “eco de 0 dB y retardo nulo” (Arthur, 2007). Otra característica en ese punto es que la relación señal-ruido es pequeña.

En la Figura 26(b), se tiene una condición en que dos señales llegan a la antena receptora con retraso nulo y, el tercero llega atrasado en relación con las otras dos señales.

En el último caso, Figura 26(c), la señal más potente es la del transmisor A seguido por otras dos señales con retardo diferentes.



**Figura 26. Localizaciones importantes para una red SFN.**

Para realizar las simulaciones inicialmente se siguió el esquema de la figura 26(a), colocando el receptor a la misma distancia (desde 8.5 hasta 11.5 km) de cada uno de los transmisores de la red. Como se puede observar en la tabla IV, la separación entre transmisores varía de 15 hasta 20 km, ya que se busca llegar al mínimo BER requerido, ya que este es el factor que delimita el alcance de la señal transmitida.

En una red con tres transmisores el alcance de cada uno de ellos aumenta, como se puede comprobar al comparar las tablas III y IV, debido a que una de las principales ventajas de una red SFN es que el receptor ve las señales de los múltiples transmisores como si fueran de uno solo, pero con retardos de propagación diferentes. Estas señales se suman de manera constructiva siempre y cuando estos retardos sean menores al intervalo de guarda; a este fenómeno se le conoce como ganancia de red o diversidad de ganancia.

**Tabla IV. BER para una red SFN con 3 transmisores: Cuando el receptor se encuentra a la misma distancia de cada uno de ellos.**

Para la figura 26(a)		
Distancia (km) entre transmisores	Distancia (km) del Rx hacia Transmisores A, B y C	BER
15	8.5	$7.968 \times 10^{-4}$
16	9.2	$8.3584 \times 10^{-4}$
17	9.8	$9.0541 \times 10^{-4}$
18	10.5	$9.4845 \times 10^{-4}$
19	11	$9.9449 \times 10^{-4}$
20	11.5	$1 \times 10^{-3}$

Las tablas V y VI son el resultado de simular de acuerdo a los esquemas de las figuras 26(b) y 26(c) respectivamente. La separación entre los transmisores de la red es de 20 km, determinada del análisis anterior. Con este dato se calculó la distancia a la que se encuentra el receptor de cada uno de los transmisores y se asignó un retardo de propagación proporcional a la distancia que recorre la señal antes de llegar al receptor. Para ambos casos se cumple el requerimiento de un BER igual a  $1 \times 10^{-3}$ .

**Tabla V. BER para una red SFN con 3 transmisores: Cuando el receptor se encuentra a las misma distancia de dos de ellos y mas alejado del tercero.**

Para la figura 26(b)			
Distancia (km) entre TA y el Rx	Distancia (km) entre TB y el Rx	Distancia (km) entre TC y el Rx	BER con interferencia
10	10	17.4	$1 \times 10^{-3}$

**Tabla VI. BER para una red SFN con 3 transmisores: Cuando el receptor se encuentra a diferente distancia de cada uno de ellos.**

Para la figura 26(c)			
Distancia (km) entre TA y el Rx	Distancia (km) entre TB y el Rx	Distancia (km) entre TC y el Rx	BER con interferencia
8.5	18	11.5	$1 \times 10^{-3}$

En base a estos resultados se determina que el área de cobertura de una red de frecuencia única con tres transmisores que difunden señales a 50kW de potencia, y que se encuentran separados 20 km, es de aproximadamente  $942.48\text{km}^2$  (suma de las áreas de cobertura de cada uno de los transmisores).

### V.2.3.1 Cálculo de cobertura en una red SFN con 7 transmisores

En la figura 27 se muestra una red SFN representada por un hexágono donde la separación entre los siete transmisores que la componen es de 20 km.

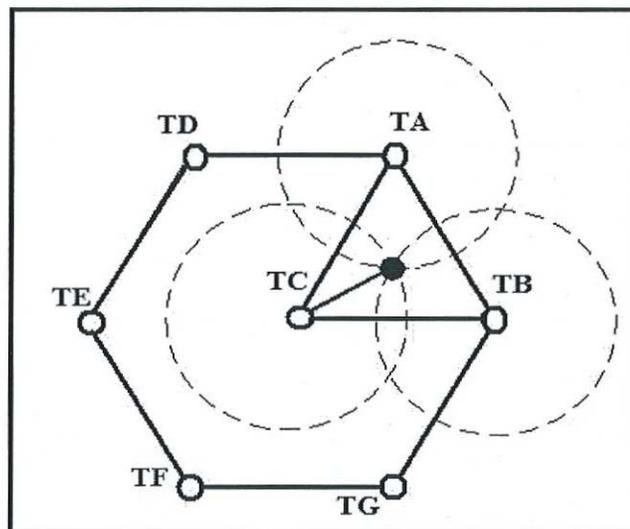


Figura 27. Red de frecuencia única con 7 transmisores

Para simular la red se calculó la distancia entre el receptor y cada uno de los transmisores considerando como base de los cálculos los tres puntos de la figura 26. Siendo la posición más desfavorable, para el receptor dentro de la red SFN, marcada con un punto en la figura 27 para representar que el receptor se encuentra a la misma distancia de los 3 transmisores más cercanos (TA, TB y TC), por lo tanto recibirá estas señales con la misma potencia y el mismo retardo (Beteta, 2005). Sin embargo las señales de los otros 4 transmisores de la red, que se encuentran mas alejados del receptor, llegaran con diferente potencia y retardo.

Para la simulación conforme aumentaba la distancia entre el receptor y cada uno de los transmisores, la potencia disminuía y el retardo asignado a las señales proveniente de estos transmisores aumentaba, siendo de  $43.7\mu\text{s}$  el máximo retardo simulado (Chari et al, 2007).

Los resultados de la simulación se resumen en la tabla VII, donde se observa que al considerar una red con 7 transmisores como la mostrada en la figura 27, para los 3 puntos de interés de la figura 26 se cumple el requerimiento de un  $\text{BER} \leq 1 \times 10^{-3}$ .

Como se puede observar en la tabla VII, entre más cerca se encuentre el receptor de uno de los siete transmisores de la red, recibirá la señal con mayor potencia y la interferencia causada por los transmisores más alejados no afecta considerablemente el área de cobertura. Además se comprueba que el punto mostrado en el figura 27 es el más desfavorable para el receptor, ya que se obtiene el mayor BER de los tres puntos simulados.

**Tabla VII. BER para una red SFN con 7 transmisores: Cuando el receptor se encuentra a diferente distancia de cada uno de ellos.**

Para la figura 27							
Distancia en km entre TA y Rx	Distancia en km entre TB y Rx	Distancia en km entre TC y Rx	Distancia en km entre TD y Rx	Distancia en km entre TE y Rx	Distancia en km entre TF y Rx	Distancia en km entre TG y Rx	BER
11.5	11.5	11.5	23.4	30.5	30.78	23.4	$1 \times 10^{-3}$
10	10	17.4	26.9	37.09	37.09	26.45	$9.6296 \times 10^{-4}$
8.5	18	11.5	16.8	25.52	31.5	28	$9.3994 \times 10^{-4}$

En base a los resultados recopilados en la tabla VII se puede demostrar que al utilizar OFDM como esquema de modulación en una red de frecuencia única se puede aprovechar al máximo la ganancia interna de la red logrando áreas de cobertura mayores a los  $2100\text{km}^2$ , utilizando una misma frecuencia.

### Conclusiones y Recomendaciones

---

#### VI.1 Conclusiones

En este trabajo de tesis se estudió la capa física del estándar para transmisión de video móvil FLO, basado en la tecnología OFDM. La eficiencia espectral de los sistemas que implementan OFDM es mucho mayor a la obtenida en sistemas FDM en los cuales las portadoras no son ortogonales entre sí. De esta manera se pueden alcanzar mayores velocidades de transmisión; en el caso específico del estándar FLO se logran velocidades de transmisión de hasta 6 Mbps en un canal con 6 MHz de ancho de banda.

El sistema FLO consiste en transmisores que operan en una red SFN, utilizando OFDM como medio de transporte para la información. Las simulaciones de esta tesis permitieron evaluar el impacto que tiene el ruido blanco gaussiano, los efectos de las multitrayectorias, la movilidad del receptor y la interferencia interna de la red, en el área de cobertura alcanzable.

De los resultados obtenidos en la simulación, se puede concluir que una red de frecuencia única genera una ganancia de red al contar con diversos transmisores, ya que la señal recibida es una superposición de las señales que vienen de varias fuentes. Sin embargo, es muy importante notar que si el receptor se encuentra cerca de uno de los transmisores de la red, la interferencia provocada por las señales de transmisores lejanos (las cuales arriban al receptor con grandes retardos de propagación) no aumenta considerablemente la tasa de bit

erróneo (BER); sin embargo, si el receptor se encuentra en un punto medio entre varios transmisores, estas señales retardadas provocan interferencia destructiva y un aumento del BER, causando que el área de cobertura de la red disminuya.

La contribución de esta investigación ha sido el brindar una referencia detallada de un modelo de simulación que permite calcular el área de cobertura alcanzable por una red de frecuencia única, basada en las características de la capa física de la interfaz de aire del estándar FLO, ya que en (Chari et al, 2007, Qualcomm, 2007 y TIA, 2006), únicas referencias técnicas del estándar que se encontraron publicadas, no se profundiza en el estudio y análisis de cobertura de la red, sino en el desempeño de la codificación de canal.

## **VI.2 Recomendaciones**

Con base en los estudios realizados y los resultados obtenidos se recomienda continuar las tareas de investigación, enfocándose en la implementación de cada uno de los bloques de generación de datos contemplados en la capa física del estándar FLO. Entre los bloques más importantes se encuentran los de codificación de canal (Código Reed Solomon y turbo código) los cuales tienen la función de agregar redundancia de manera inteligente para contrarrestar los efectos nocivos del canal radio.

Ya que el estándar FLO maneja 12 modos de transmisión que dependen de la tasa de codificación del turbo código (1/3, 1/2, 2/3, 1/5) y del esquema de modulación (QPSK, QAM y Modulación por capas), sería importante evaluar el comportamiento del sistema OFDM para los diferentes modos de transmisión, con la finalidad de realizar un estudio comparativo entre ellos.

Del estudio comparativo se podría determinar el modo de transmisión más eficiente, para implementar una red SFN donde el área de cobertura se vea afectada principalmente por el retardo de propagación de las señales y no por el ruido introducido por el canal radio.

## Referencias

- Arthur R., Iano Y., Carvalho S.R.M. y Larico R.F. 2007. Planificación de la expansión del servicio de retransmisión de TV digital en Brasil usando redes SFN. IEEE Latin America Transaction. 5(8): 573-578 p.
- Beteta Cejudo J.F. 2000. Cobertura de un sistema de televisión digital terrenal. <http://www.asenmac.com/tvdigital2/sfn.htm> [Consultada en Julio de 2008].
- Brigham, E. 1998. The Fast Fourier Transform and its applications. Prentice-Hall. Englewood Cliffs, N. J. 448 pp.
- Chan Kim J. y Young Kim J. 2006. Single Frequency Network Design of DVB-H (Digital Video Broadcasting - Handheld) System. ICACT2006. <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/login.jsp?url=/iel5/10826/34122/01625897.pdf?temp=x> [onsultada en Junio de 2008].
- Chang R.W.1996. "Synthesis of band -limited orthogonal signals for multichannel data transmission system." Bell sys, tech. J., 45: 1775-1796 p.
- Chari R. M., Ling F., Mantravadi Ashok, K., Vijayan R., Walker G. K. y Chandhok R. 2007. FLO Physical Layer: An Overview. IEEE Transactions on Broadcasting. 53(1):145-160p.
- Chuberre, N., Bodevin F. y Courseille O. 2006. Digital Video Broadcast to handheld via hybrid satellite/terrestrial network. Alcatel Telecommunications Review.
- Cochran, W., Cooley J., Favon D., Helms H., Kaenel R., Lang W., Maling G., Nelson D., Rader C. y Welch P. 1967. What is the Fast Fourier Transform? IEEE Transactions on audio and electroacustics.
- Dans, E. 2007. El imparable éxito del video. PC Actual.
- Edfors O., Sandell M., Van de Beek J., Landstrom D. y Sjoberg F. 1996. An introduction to orthogonal frequency division multiplexing. <http://www.sm.luth.se/csee/sp/research/report/esb96rc.pdf> [Consultada en Julio de 2008].
- Gómez Barquero, D., Salieta A., Garcia A.P., Moserrat J.F. y Cardona N. 2007. Planificación de una red DVB-H en un entorno urbano. Sistemas y Telemática. Universidad ICESI. [http://dspace.icesi.edu.co/dspace/bitstream/item/1173/1/Planificacion\\_red\\_DVB-H\\_entorno\\_urbano.pdf](http://dspace.icesi.edu.co/dspace/bitstream/item/1173/1/Planificacion_red_DVB-H_entorno_urbano.pdf) [Consultada en Junio de 2008].

- Gómez Barquero, D., Salieta A., Garcia A.P., Moserrat J.F. y Cardona N. 2007. Planificación de una red DVB-H en la ciudad de Valencia. Universidad Politécnica de Valencia.  
[http://www.furiapse.com/pdf/TelecomID06\\_DVB-H\\_Planificacion.pdf](http://www.furiapse.com/pdf/TelecomID06_DVB-H_Planificacion.pdf) [Consultada en Junio de 2008].
- Jeffrey G. A., Arunabha G. y Rias M. 2007. Fundamentals of WIMAX Understanding Broadband Wireless Networking, Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ.449 pp.
- Ligeti A. 1999. Single Frequency Network Planning. Royal Institute of Technology. [http://www.diva-portal.org/diva/getDocument?urn\\_nbn\\_se\\_kth\\_diva-2857-2\\_fulltext.pdf](http://www.diva-portal.org/diva/getDocument?urn_nbn_se_kth_diva-2857-2_fulltext.pdf) [Consultada en Julio de 2008].
- Malmgren G. 1996. Network Planning of Single Frequency Broadcasting Networks. Royal Intitute of Technology.  
<http://www.springerlink.com/content/kkw6160682568843/> [consultada en Junio de 2008].
- Marianov V., Oberli C. y Ríos M. 2006. Análisis de los Estándares de Transmisión de Televisión Digital Terrestre y su Aplicabilidad al Medio Nacional. Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Martin Fernández, Miguel Ángel. 2005. Radiodifusión digital. Universidad de Valladolid. [http://www.lpi.tel.uva.es/~miguel/pdf/ingenieria\\_ondas\\_II/0506/dab.pdf](http://www.lpi.tel.uva.es/~miguel/pdf/ingenieria_ondas_II/0506/dab.pdf) [consultada en julio de 2008].
- Mathworks, Inc.  
<http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/commblocks/index.html?access/helpdesk/help/toolbox/commblocks/ref/raisedcosinetransmitfilter.html> [Consultada en Julio de 2008].
- Orgad S. 2006. "This Box Was Made for Walking ... How Will Mobile Television Transform Viewers' Experience and Change Advertising?"
- Peled, A. and Ruiz, A. 1980. Frequency Domain Data Transmission using Reduced Computational Complexity Algorithms," Proc. IEEE Int. Conf. Acoust. Speech, Signal Processing.
- Prasad R. 2004. OFDM for Wireless Communicatios Systems, Artech House. Boston. 272 pp.

- Prastomo G. 2003.  
<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/loadAuthor.do?objectType=author&objectId=1093750> [Consultada en Mayo de 2008].
- Qualcomm. 2007. FLO Technology Overview.  
<http://www.mediaflo.com/mediaflo/index.html> [Consultada en Julio de 2008].
- Qualcomm. 2007. MediaFLO Field Test Report 80-T1021-1 Rev. D.  
<http://www.mediaflo.com/mediaflo/index.html> [Consultada en Julio de 2008].
- Rappaport T.S. 1999. Wireless communications: principles and practice. Prentice Hall. Upper Saddle River, N.J. 641 pp.
- Saltzberg B.R. 1967. "Performance of an efficient parallel data transmission system," *IEEE Trans Com Technol*, 15.
- Schulze H. y Luders C. 2005. Theory and Application of OFDM and CDMA Wideband Wireless Communications. Wiley. Germany. 408 pp.
- Solomon Y, 2007 "The Economics of Mobile Broadcast TV", Mobile DTV Alliance Whitepaper.  
[www.mdtvalliance.org/imwp/download.asp?ContentID=10295](http://www.mdtvalliance.org/imwp/download.asp?ContentID=10295) [Consultada en Septiembre de 2007].
- Telecommunications Industry Association (TIA). 2006 Forward Link Only air Interface Specification for Terrestrial Mobile Multimedia Multicast.  
[http://electronics.ihp.com/news/tia-air-interface.htm?wbc\\_purpose=Basic&WBCMODE=http%3A%2Chttp%3A%2Chttp%3A%2Chttp%3A](http://electronics.ihp.com/news/tia-air-interface.htm?wbc_purpose=Basic&WBCMODE=http%3A%2Chttp%3A%2Chttp%3A%2Chttp%3A) [Consultada en Mayo de 2008].
- Van Nee R. y Prasad R. 2000. OFDM for Wireless Multimedia Communications, Artech House. Boston. 260 pp.
- Weinstein, S. B. y Ebert, P. M. 1971. Data Transmission by Frequency-Division Multiplexing using the Discrete Fourier Transform," *IEEE Transactions on Communications*, 19(5): 628-634p.
- Worm A., Hoehner P. y Wehn N. 2000. Turbo-Decoding without SNR estimation.  
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.61.6018> [Consultada en Junio de 2008].