Análisis y Simulación de la técnica de modulación por División de Frecuencia Ortogonal (SOFDM) aplicada al sistema de transmisión terrestre de televisión digital

Phaleone Krítikos, (1); Andrés Bustos, (1); Rebecca. Estrada, (2)
[1] Miembros de la tesis previa la obtención del Título de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones
[2] Director de Tesis Master en Ciencias Telecomunicaciones
[1]Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación
Escuela Superior Politécnica del Litoral
Campus Prosperina, Km 30.5 vía Perimetral, Guayaquil, Ecuador
{pkritiko, abustos, restrada}@fiec.espol.edu.ec

Resumen

La televisión analógica apareció en el Ecuador a principios de los 60's, se trataba de aparatos en blanco y negro de muy mala calidad. Desde entonces se dedica más que todo a transmitir telenovelas, programas de concursos, noticieros y películas. Las mejoras que sufrió la televisión analógica es el hecho de poder diferenciar colores y la gama de televisores que salen al mercado con características como pantalla plana, sonido envolvente, etc.
Desgraciadamente en la televisión local no existe contenido interactivo y la calidad en algunos sectores deja mucho que desear. Por otro lado la televisión digital brinda nitidez, mayor número de canales o canales con más opciones, aplicaciones de telecomunicaciones, incluso movilidad.
Nuestro trabajo de investigación se dividirá en dos partes principales. La primera consistirá en un estudio socio-económico del impacto que causaría el que la televisión nacional cambie a digital, si estamos en condiciones de hacerlo, y qué estándar nos convienes. En la segunda parte aplicaremos la modulación SOFDM usando simulaciones realizadas en Simulink, herramienta de Matlab, para lograr un análisis técnico de esta tecnología aplicada a los estándares de Televisión Digital Terrestre (TDT); y comparar los resultados obtenidos con simulaciones hechas con OFDM.

Palabras Claves: *SOFDM, Simulink, TDT, OFDM*

Abstract

Analog Television appeared in Ecuador at beginning of the 60's, it was about very bad quality black and white appliances. Since then it's dedicated to broadcast soup-operas, contest programs, news and movies. The improvements that analog television had were the fact of differentiate colors and the variety of televisions that go out to the market with characteristics like flat screen, surround sound, etc.
Unfortunately, local TV doesn't show interactive content and the quality of the signal is very poor in some regions. In the other hand, digital television offers clearness, a greater number of channels or channels with more options, telecommunication features, even mobility.
Our investigation work will be divided into two main parts. The first one will consist in a socioeconomic study of the impact that it would cause the fact that national TV changes into digital, if we are in conditions to do it, and what standard favors us. In the second part we will apply SOFDM modulation using simulations made on Simulink, a Maltab tool, to get a technical analysis of this technology applied to the Terrestrial Digital Television (TDT) standards; and to compare the obtained results with simulations made with OFDM.

1. Introducción

Alrededor del mundo se viene dando una revolución tecnológica y social a través de la televisión y los medios de comunicación en general. El entretenimiento es una industria multimillonaria que ha crecido a tal nivel y nos ha absorbido de tal modo que hasta nuestras costumbres se han adaptado a ella. Sacamos tiempo de nuestra agenda para ver nuestro programa favorito, que muchas veces se hace un hábito y se ha comprobado que en gran cantidad de persona llega a convertirse en un vicio.

Por esta razón los países industrializados han buscado la manera de aprovechar al máximo el espectro que se les ha otorgado para ofrecer sus servicios y han desarrollado un sistema de transmisión digital que permite muchas más opciones que la televisión analógica; hasta lo que nunca se pensó, poder comunicarnos a través de ella. Por ésta y muchas otras ventajas la mayoría de los países europeos, norteamericanos, y asiáticos ya se han cambiado a este esquema y el resto de naciones está buscando los medios para seguir ese camino.

En nuestro país, este cambio ha tomado más tiempo de lo esperado; pero la televisión no puede quedarse con el modelo actual. Por tanto se debe escoger la mejor vía para migrar del sistema analógico al digital, sin afectar de manera indebida las costumbres y el bolsillo de nuestra gente.

Los principios de OFDM han existido por algunas décadas; pero no es sino hasta hace pocos años que esta técnica ha sido implementada de forma práctica. De aquí que una variante de esta técnica nos permite tener una señal todavía más robusta, mejorando la calidad de la misma que en un sistema digital es una característica muy deseada.

En nuestro proyecto aplicaremos dicha variante a los sistemas de transmisión de televisión digital terrestre que originalmente usan modulación OFDM, para verificar si el hecho de reemplazarla por SOFDM proporciona una ventaja sobre su predecesora. Y conjuntamente con ello realizar un estudio sobre el impacto en la población.

2. Herramientas

El proceso de transmisión de la programación por parte de las emisoras hace uso de sofisticados transmisores.

Para el presente proyecto no se han utilizado transmisores reales como los que usan los canales de televisión, en su lugar se ha hecho uso de una herramienta muy popular entre los estudiantes de telecomunicaciones, Simulink de Matlab que es un software propietario. Así por ejemplo, se simula el transmisor, el receptor y el canal por el que deberá viajar la señal.

3. Análisis de los estándares de DTV (Digital Television)

La televisión digital usa tres estándares principalmente, dos de los cuales usan la tecnología que vamos a probar en este proyecto.

3.1 Modulacion OFDM y SOFDM

La modulación OFDM se basa en portadoras ortogonales que tienen la capacidad de solaparse y son enviadas en paralelo. Es muy inmune al muido y a la interferencia cocanal. [1]

La variante que proponemos en nuestro proyecto se llama SOFDM y se diferencia de OFDM en que multiplica la información por una matriz de ensanchamiento que usualmente es una matriz Hadamard (tecnica de espectro ensanchado). Esto proporciona a la señal mejoras en cuanto disminuye la tasa de error de bit (BER), reduce la potencia de pico-a-promedio (PARP) de las señales de los sistemas de multiportadoras, e incrementa la diversidad de frecuencia. [2]

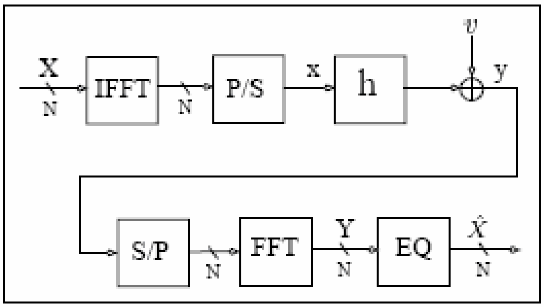

Figura 1. Sistema OFDM Convencional

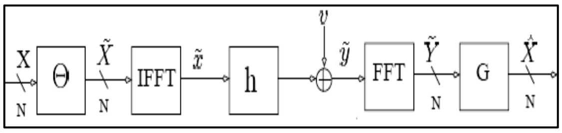

Figura 2. Sistema SOFDM (Spread OFDM)

El filtro Wiener se desarrolla de la siguiente manera:

$$\hat{X} = G\hat{Y} .$$

$$G = \arg \min_{W} \left\| W^{H} \hat{X} - X \right\|^{2} = \Theta^{T} F$$

$$F = diag \left(\frac{c_1^*}{\left| c_1 \right|^2 + \sigma^2}, \ldots, \frac{c_N^*}{\left| c_N \right|^2 + \sigma^2} \right)$$

donde,

Θ es la matriz de Hadamard,

c_i indica las atenuaciones por cada subcanal, y

σ^2 es la varianza del ruido en el canal.

Esto simplifica los cálculos al no incluir un equalizador complejo.

3.2 Estándares de DTV

3.2.1 DVB-T

Digital Video Broadcasting (DVB) es el estándar de televisión digital más popular en el mundo, en especial en Europa donde casi todos los países de ese continente lo han escogido.

Como DVB-T está destinado a reemplazar la televisión analógica usa los mismos anchos de banda que ésta (6, 7 y 8 MHz). En este caso el estándar MPEG define básicamente los decodificadores, permitiendo diversidad de codificadores.

DVB-T utiliza la modulación OFDM, implementa redes de frecuencia única, que permiten emitir un grupo de 4 programas a todo un territorio utilizando la misma frecuencia.

Este estándar utiliza Codec OFDM (COFDM) que es la modulación OFDM más un codificador convolucional y un intercalador como podemos observar en la figura 3.[3]

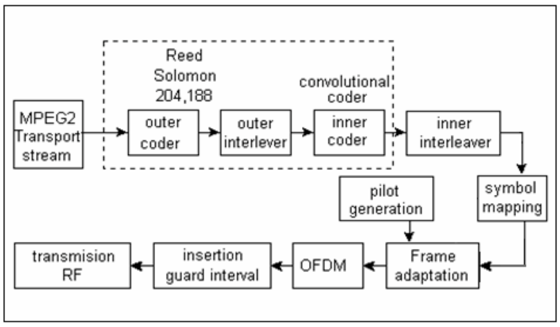

Figura 3. Diagrama de bloques de sistema DVB-T

En el caso de DVB-T la cantidad de portadoras deberá ser como mínimo 2048 (1705 portadoras útiles) en el modo 2k y 8192 (6817 portadoras útiles) en el modelo 8k. Por motivo de nuestra investigación usaremos el modo 2k ya que es adecuado para la cantidad de información que queremos enviar que son 1512 símbolos por bloque. [4]

A continuación se muestra una tabla con los parámetros establecidos para dicho modo.

Tabla 1. Parámetros de DVB-T en modo 2k

Parámetro	Modo 2k			
Periodo elementario T	7/64 µs			
Número de portadoras K	1,705			
Número mínimo de portadoras Kmin	0			
Número máximo de portadoras Kmax	1,704			
Duración Tu	224 µs			
Espacioado de portadoras 1/Tu	4,464 Hz			
Espaciado entre Kmin y Kmax(K-1)/Tu	7.61 MHz			
Intervalo de guarda permitido Δ/Tu	1/4	1/8	1/16	1/32
Duración de parte Tu del símbolo	2,048xT 224 µs			
Duración del intervalo de guarda Δ	56 µs	28 µs	14 µs	64xT 7 µs
Duración del símbolo Ts=Δ+Tu	280 µs	252 µs	238 µs	2.112x T 231 µs

3.2.2 ISDB-T

Integrated Services Digital Broadcasting Terrestrial es el sistema de televisión digital usado en Japón, siendo éste el único país que lo ha adoptado, debido también a que fue desarrollado para las necesidades específicas de ese territorio. Ha evolucionado del DVB-T, por lo que usa casi los mismos bloques que se presentan en ese estándar pero es más versátil e incluye algunas mejoras como:

- Transmisión de datos.
- Recepción muy estable en celulares, computadoras y demás equipos inalámbricos.
- Búsqueda de programación y recuperación de información en cualquier momento.
- Acceso a Internet.
- Intercalación en el tiempo para ahorrar energía.

ISDB-T permite transmisión jerárquica, que hace posible que diferentes receptores reciban la señal, la procesen y generen imagen y sonido de acuerdo a sus características. Estos receptores son de banda ancha y banda angosta. Esta característica habilita a los receptores de banda estrecha recibir apenas una parte de la señal. Para que esto sea posible se divide el espectro en segmentos donde cada uno tiene un número de portadoras de datos y control dependiendo del modo que se escoja. Esta agrupación de portadoras se denomina OFDM de banda segmentada ó Band Segmented Transmission (BST-OFDM), que divide el espectro en 13 segmentos iguales donde se pueden enviar un programa HDTV o tres programas SDTV, y en el cual un segmento está reservado para transmisión móvil. [5]

3.2.3 Redes de Frecuencia Unica

Single Frequency Networks (SFN) son redes de frecuencia única. Significa que tenemos transmisores emitiendo en la misma frecuencia.

Una ventaja de esta red es que los transmisores emiten menos potencia debido a la ganancia interna que se produce debido a que se suman las señales procedentes de los diversos emisores. Además se pueden rellenar zonas vacías con reusos de frecuencia colocando transmisores de muy baja potencia.

La desventaja de estas redes es que se necesita sincronización entre los transmisores, además que se debe emitir la misma programación al mismo tiempo en todas las áreas. [3]

3.3 Estándar más conveniente en nuestro país

El Estado deberá decidir de qué manera cobrará las licencias correspondientes al uso del espectro, recordemos que ya no será uno sino hasta cuatro programas que se podrán transmitir al mismo tiempo.

Además, los canales se tendrán que conformar con el estándar que el Estado escoja ya que debe ser unificado para el país. También deberán acatar las políticas regulatorias que se especifiquen para el nuevo uso del espectro. Se deberán cumplir plazos para la transición a la TV digital, plazo en el cual las emisoras el esquema actual deberá coexistir con el analógico hasta que se produzca el apagón analógico. [6]

3.3.1 Propósito y Beneficios

Se deberá dar más énfasis a la calidad de programación con un enfoque más educativo; programas culturales, turísticos, y de diversas índoles sería el camino más propicio para aprovechar todo el espectro que se va a obtener. Se dará mas apertura a la producción nacional y se tendrán canales más dedicados a cierta rama; como por ejemplo noticias y deportes, entretenimiento, salud y variedades, etc., esto implicará contratar más presentadores, guionistas, directores, productores, técnicos y la infraestructura misma del canal deberá crecer para poder abarcar el nuevo modelo programático y de negocios. [7]

Se puede apreciar claramente que los usuarios serán los más beneficiados de este proyecto y al mismo precio de siempre: GRATIS. Además de disfrutar de los siguientes servicios:

- Más canales de donde escoger y programación más variada.
- Mejor señal: recibir en sus hogares la calidad de un DVD.
- Multimedia e interactivos: comunicarse en tiempo real con el canal de televisión, hacer compras por TV, concursos, etc.
- Recepción móvil: ver televisión nacional en PC's, buses, celulares, PDA's, incluso en nuestros propios autos.
- Servicio de datos. Acceso a Internet.
- Guía de programación las 24 horas del día. [8]

3.3.2 Modelo a seguir

El estándar más conveniente es el DVB-T, ya que ATSC fue pensado para transmitir un canal HDTV; e ISDB-T también aunque éste puede ofrecer 3 canales SDTV (DVB-T puede transmitir hasta cuatro). El canal faltante en ISDB-T es ocupado para recepción móvil. Pero DVB-T también ofrece recepción móvil sin necesidad de afectar los canales de recepción fija con el estándar DVB-H del mismo grupo DVB, esta es otra ventada relacionada a este estándar.

En la siguiente figura se muestran las bondades de los diferentes estándares y se diferencia claramente que DVB-T es el más completo. Low Definition Televisión (LDTV) denota los canales de baja definición, dos programas de baja definición pueden ser enviados en el espacio disponible para un programa SDTV. No se los toma en cuenta para este trabajo porque el objetivo de la televisión digital es brindar calidad de DVD, y los canales LDTV no nos brindan dicha opción. [9]

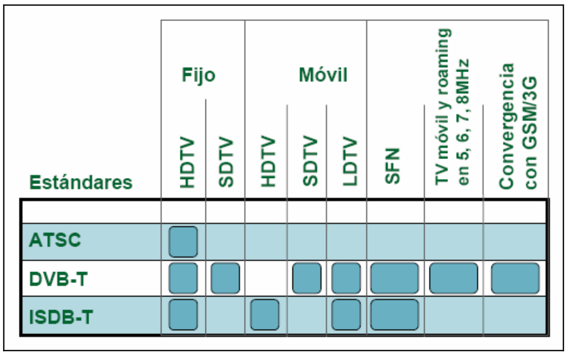

Figura 4. Servicios por estándar

Podemos añadir que con el estándar DVB-T contamos con la experiencia de muchos países que han ayudado al desarrollo y fortalecimiento del mismo, países que no van a dejar de usar este sistema y por tanto existe la certeza de la disponibilidad de esta tecnología por muchos años más. En la siguiente tabla se muestra la comparación de los estándares por el número de países que lo han adoptado. [10]

Tabla 2. Estándares por países

DVB-T		ATSC	ISDB-T
Albania	Irán	Estados	Japón
Alemania	Irlanda	Unidos	Brasil
Andorra	Islandia	Canadá	
Australia	Italia	Corea del	
Austria	Lituania	Sur	
Bélgica	Luxemburgo	México	
Brunei	Macedonia	Argentina	
Bulgaria	Malasia		
Chipre	Malta		
Croacia	Namibia		
Dinamarca	Noruega		
Eslovaquia	Polonia		
Eslovenia	Rumania		
España	Rusia		
Finlandia	Singapur		
Francia	Suecia		
Grecia	Suiza		
Hungría	Taiwán		
India	Turquía		
Inglaterra	Vietnam		

Además debido a que DVB-T está presente en una gran cantidad de países, posee grandes economías de escala y por lo tanto un bajo costo de dispositivos, tanto integrados como decodificadores. [11]

Por lo tanto creemos que el modelo a seguir debería ser el del televisor actual (analógico) o un display digital con formato 4:3 (para apreciar mejor la calidad DVD y el cual es mucho más barato que un televisor 16:9) más el STB, por una razón muy importante, la migración definitiva a televisión digital podría tomar algunos años y todo ese tiempo el televidente podrá ver en el mismo televisor ambas tecnologías sólo con la compra de un STB. El estándar DVB-T permitiría este modelo, y en un futuro si el público lo prefiere se podría migrar a HDTV.

4. Simulaciones

4.1 Diseño del canal

Se han definido dos entornos en concreto, los entornos domesticos y los entornos de negocios (aeropuertos, universidades, hospitales). La BRAN (Broadband Radio Acces Network) define 5 modelos de canal para utilizar en las simulaciones definidas en la tabla 2 en función de los respectivos entornos:

Tabla 3. Modelos de canal HIPERLAN/2

Canal	Delay RMS	Característica	Tipo de ambiente
A	50ns	Rayleigh	Oficina, NLOS (no line of sight)
B	100ns	Rayleigh	Espacio abierto/oficina, NLOS
C	150ns	Rayleigh	Gran espacio abierto, NLOS
D	140ns	Riciano	Como canal C con LOS
E	250ns	Rayleigh	Gran espacio abierto, NLOS

La respuesta inpulsional en banda base del canal es:

$$h(t,\tau) = \sum_{i=l}^{L_{path}} \gamma_i(t)\delta(\tau - \tau_i)$$

Donde τ y γi son el retardo y la variación de la amplitud compleja en los tiempos de la ruta i. Lpath es el numero de rutas totales y $\delta(t)$ es la función de Dirac

El perfil de la potencia media de cada ruta decrece exponencialmente en el tiempo. Las rutas tienen un comportamiento estadístico Rayleigh, excepto la primera ruta que presenta un factor Ricean de 10 db (canal D). También se considera el efecto doppler correspondiente a un terminal móvil a una velocidad maxima de 3m/s. [12]

Los siguientes son los valores finales usados en nuestra simulación que corresponden al canal B:

Tabla 4. Modelo B

#	Delay (ns)	Potencia relativa promedio dB	K Ricean	Espectro Doppler
1	0	-2.6	0	Clase
2	10	-3.0	0	Clase
3	20	-3.5	0	Clase
4	30	-3.9	0	Clase
5	50	0.0	0	Clase
6	80	-1.3	0	Clase
7	110	-2.6	0	Clase
8	140	-3.9	0	Clase
9	180	-3.4	0	Clase
10	230	-5.6	0	Clase
11	280	-7.7	0	Clase
12	330	-9.9	0	Clase
13	380	-12.1	0	Clase
14	430	-14.3	0	Clase
15	490	-15.4	0	Clase
16	560	-18.4	0	Clase
17	640	-20.7	0	Clase
18	730	-24.6	0	Clase

4.2 Simulación de la técnica SOFDM

Matlab cuenta con un demo del estándar DVB-T usando la técnica de modulación OFDM sobre el cual trabajamos para realizar la simulación de la modulación SOFDM.

En la figura 6 se pueden diferenciar el transmisor y el receptor SOFDM, los cuales explicamos en detalle en las secciones 4.2.1 y 4.2.2. Nótese que aumentamos un canal multiruta para asemejar lo más posible a la realidad el camino que deberá cruzar la señal, y al canal de ruido Gaussiano le configuramos una varianza de 4e-6 dando un SNR de 25.4dB.

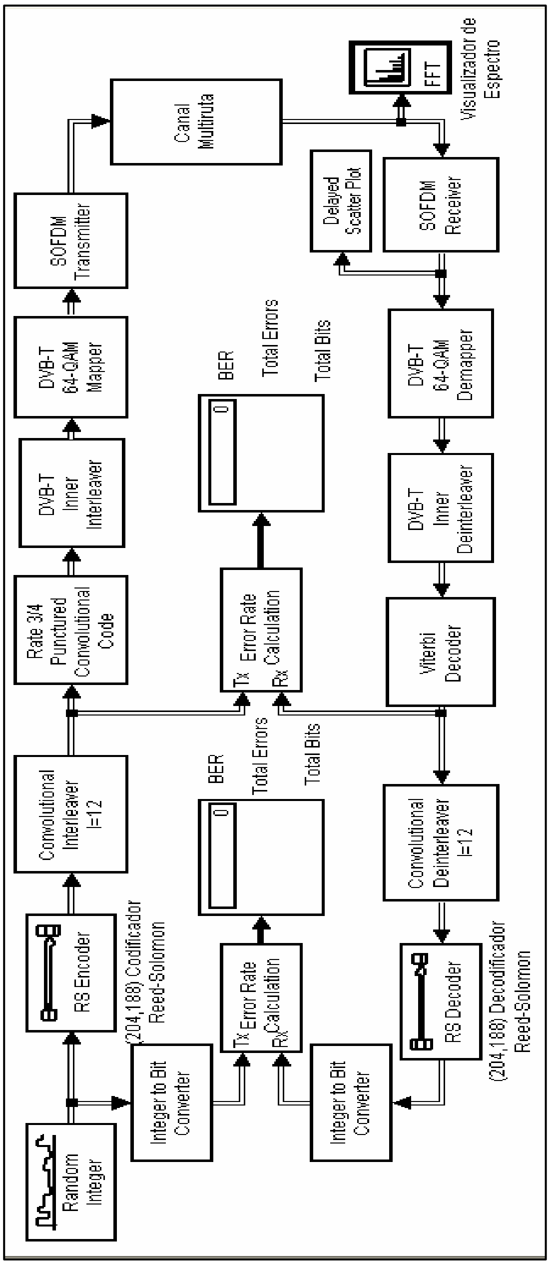

Figura 6. Simulación DVB-T usando modulación SOFDM

4.2.1 Transmisor SOFDM

En la figura 7 podemos apreciar una fuente llamada *mh* que no es otra cosa que la matriz de Hadamard como lo explicamos en la sección 3.1, que va multiplicada con los datos a transmitirse, antes de pasar por la transformada de Fourier inversa.

El archivo mh.mat contiene lo siguiente:

mh = Hadamard(2048)

Debido a que deseamos obtener una matriz cuyo tamaño sea igual al número de portadoras que vamos a utilizar, es decir 2048.

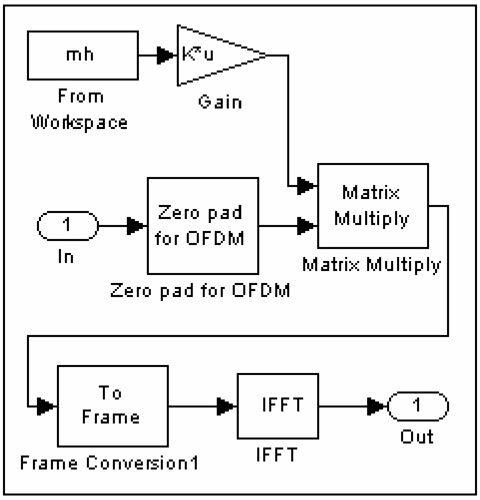

Figura 7. Transmisor SOFDM

4.2.2 Receptor SOFDM

En el receptor se usan los datos del canal obtenido de la fuente F, como se muestra en la figura 8. Estos datos forman una matriz diagonal que se multiplica con la matriz de Hadamard *mh* que viene de la misma fuente que en la figura 7. La matriz resultante se multiplica con los datos que vienen de la transformada de Fourier.

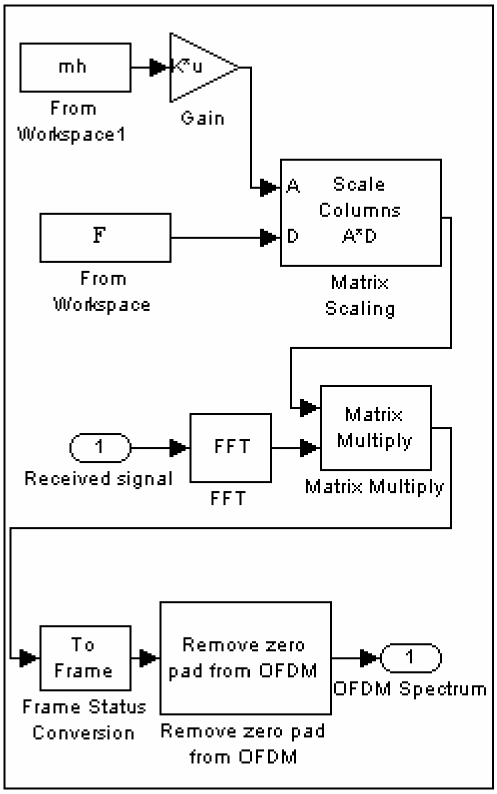

Figura 8. Receptor SOFDM

Se deduce el canal obteniendo información de lo que se envia y de lo que se recibe. Asi en *F* está contenida información del canal haciendo uso del siguiente script:

```
for i=1:1:49
   xm(:,i)=x(:,1,i);
end
for i=1:1:49
   ym(:,i)=y(:,1,i);
end
Y=ym(,9:1:45);
X=xm(,9:1:45);
a=Y./X;
a=mean(a');
a=a';
F.signals.values=num./(den+4e-6);
F.signals.dimensions=size(F.signals.values);
```

donde:
x es la transformada de Fourier de la entrada de datos al canal multiruta,
y es la transformada de Fourier de la salida de datos del canal multiruta.

Esto se necesita realizar cada vez que el canal cambia su respuesta impulsional. Es el proceso parecido al uso de pilotos para conocer los cambios en el canal

5. Resultados

Como muestra la figura 9, el espectro se ubica en alrededor de los 7MHz, que es el ancho de banda aproximado de un canal analógico. Y en la figura 10 se puede observar la constelación generada.

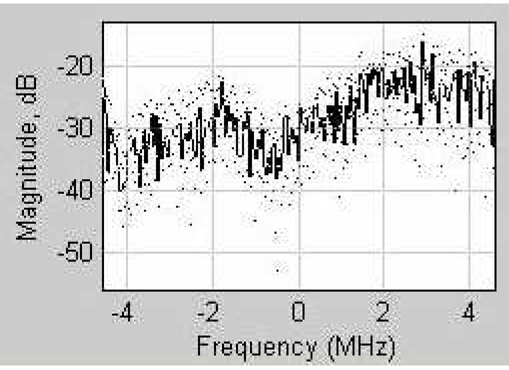

Figura 9. Espectro de la señal transmitida

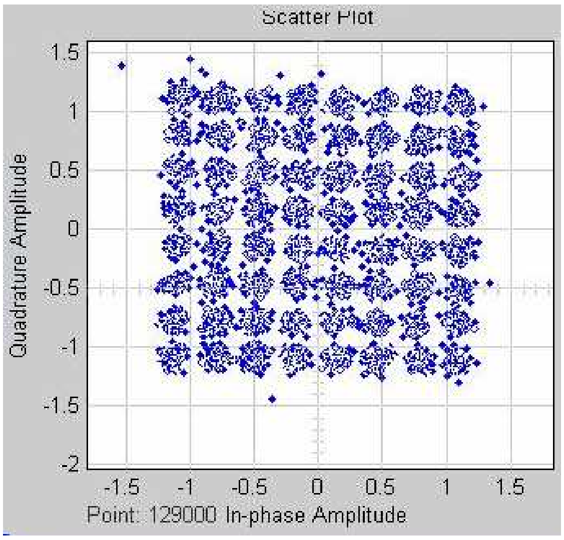

Figura 10. Constelacion QAM 64 resultante despues de la ecualización y la decodificación de la matriz de hadamard

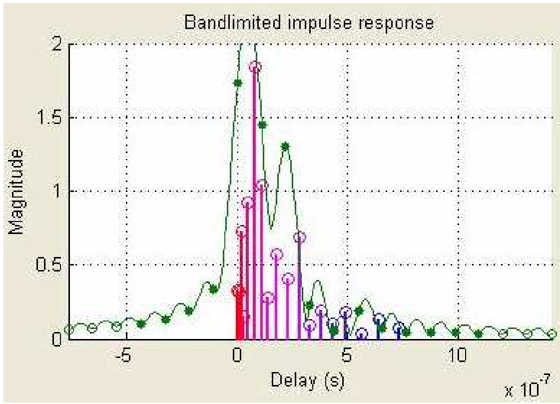

Figura 11. Respuesta implusional de canal multiruta

Luego del análisis correspondiente se recogió información para realizar el siguiente gráfico de la BER.

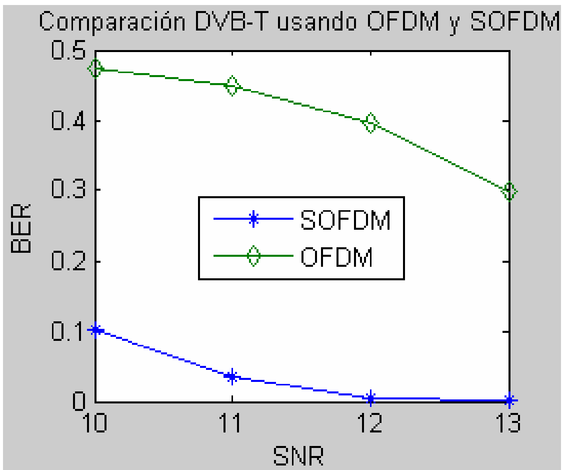

Figura 12: BER vs SNR del estándar DVB-T usando ambas modulaciones

El sistema SOFDM demostró ser más eficiente en los ambientes multiruta, al tener una tasa de error de bit casi nula, al configurar la SNR en valores superiores al 13 el lector de la BER presenta un valor de cero, como se puede apreciar en la figuras 12 y 13. Por lo que podemos concluir que se genera una mejora significativa en comparación a su predecesora OFDM.

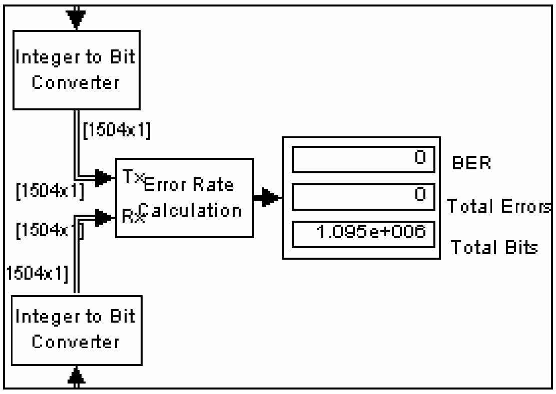

Figura 13. Tasa de error de bit

Podemos agregar al análisis que la media instantánea de PAPR disminuyó en 3.43 db en el sistema con spreading.

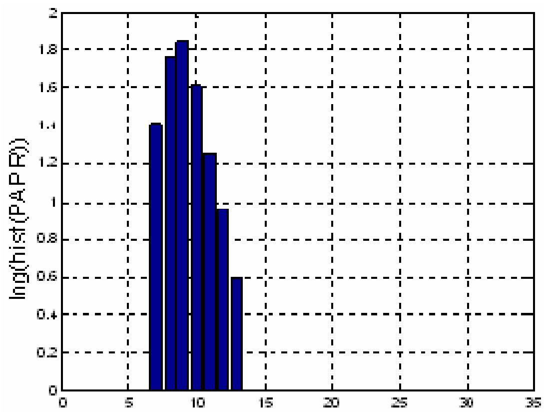

Figura 13. PAPR usando spreading

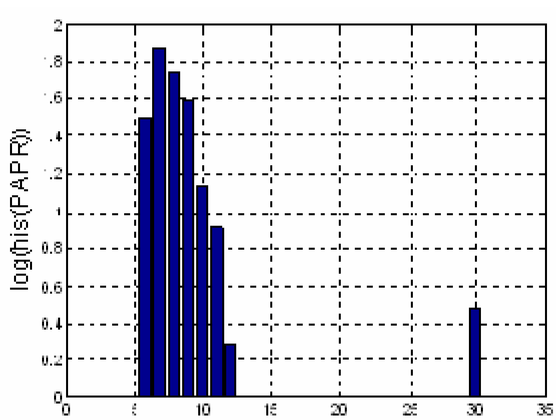

Figura 13. PAPR sin usar spreading

6. Conclusiones

A lo largo de la elaboración de este trabajo hemos llegado a las siguientes conclusiones:

- La técnica de modulación SOFDM es teóricamente superior a su predecesora OFDM en cuanto a calidad de señal y emisión de potencia.
- El estándar más conveniente para nuestro país es el DVB-T ya que posee economías a escala que significan costos más bajos, además cuenta con otros estándares del grupo DVB con los que se pueden obtener muchos beneficios adicionales; y cuenta con muchas más unidades vendidas a nivel mundial que los otras estándares.
- EL modelo a seguir debería ser el de multiprogramación, con la compra de un decodificador digital para disfrutar de ambas tecnologías, la digital y la analógica, y al menos costo para el usuario.
- Después de haber realizado las comparaciones respectivas, se ha escogido el esquema que para nosotros debería converger hacia la televisión digital, el cual es SOFDM debido a que presenta una menor tasa de error de bit y menor PAPR. Siempre y cuando se cuente con los recursos suficientes para ello, ya que estaríamos hablando de tener nuestro propio estándar.

7. Bibliografía y referencias

[1] "Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM): Tutorial and análisis"; Erich Cosby, Northern Virginia Center, Virginia Tech, diciembre 2001

[2] "Modulation and Channel Effects in Digital Communication", Sara Sandberg, Suecia, 2005, pág. 20.

[3] "Cobertura de un sistema de televisión digital terrenal"; Juan Félix Beteta Cejudo, febrero 2000

[4] Smart Antenna Research Laboratory, OFDM Simulation Using Matlab"; Guillermo Acosta, Estados Unidos, agosto 2000

[5] "Standard I ISDB-T (Integrated Services Digital Broadcasting Terrestrial)"; Osvaldo Kawakita, NEC Argentina SA, octubre 2006

[6] "Desafíos regulatorios para la adopción de la norma de la televisión digital terrestre TDT"; Fernando Acuña, mayo 2006

[7] "Televisao digital terrestre: sistemas, padroes e modelos"; Almir Antonio Rosa, Sao Paulo, 2005

[8] "TV digital , potencialidades e disputas"; Valério Cruz Brittos, César Ricardo Siqueira Bolaño, Brasil, 2004

[9] "Convergencia de Redes. Rol de la TV Digital"; José Manuel Martín Ríos, Ciudad de Guatemala, septiembre del 2006

[10] "DVB-T Ventajas Tecnológicas para un éxito mundial"; Empresas Europeas en Argentina, agosto 2006

[11] "Adoptar o no DVB, ¿he ahí el dilema!"; pc-news, octubre 2006

[12] "Equalitzador de canal per a modulacions ofdm segons l'estándar hiperlan/2", Moises Serra, David Novo, Pere Marti, Francia, 2003