



**Universidad  
Tecnológica de Bolívar**  
CARTAGENA DE INDIAS

El conocimiento **crece** en la **UTB**

**LABORATORIOS DE SIMULACION DE UN SISTEMA DE MULTIPLEXACION  
POR DIVISION DE FRECUENCIAS ORTOGONALES**

**CHRISTIAN MAURICIO SIERRA TERÁN  
YADY LAMBIS URUETA**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS  
ESPECIALIZACION EN TELECOMUNICACIONES  
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLIVAR  
CARTAGENA DE INDIAS D. T. Y C.  
2011**



**Universidad  
Tecnológica de Bolívar**  
CARTAGENA DE INDIAS

El conocimiento **crece** en la **UTB**

**LABORATORIOS DE SIMULACION DE UN SISTEMA DE MULTIPLEXACION  
POR DIVISION DE FRECUENCIAS ORTOGONALES**

**CHRISTIAN MAURICIO SIERRA TERÁN  
YADY DEL CARMEN LAMBIS URUETA**

**TRABAJO PRESENTADA  
COMO REQUISITO PARA OPTAR EL TÍTULO DE:  
ESPECIALISTA EN TELECOMUNICACIONES**

**DIRECTOR:  
GONZALO LÓPEZ VERGARA  
MSc. TELEMATICA**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS  
ESPECIALIZACIÓN EN TELECOMUNICACIONES  
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR  
CARTAGENA DE INDIAS D. T. Y C.  
2011**

## AUTORIZACIÓN

Cartagena de Indias D. T. y C.

Yo, CHRISTIAN MAURICIO SIERRA TERAN, identificado con cedula de ciudadanía número 1.143.355.847 de Cartagena, autorizo y doy amplias facultades a la UNIVERSIDAD TECNOLOGICA DE BOLIVAR para hacer uso de este trabajo de grado y publicarlo en el catalogo Online de la biblioteca.

---

Christian M. Sierra Teran

C.C# 1.143.355.847 de Cartagena

## AUTORIZACIÓN

Cartagena de Indias D. T. y C.

Yo, YADY LAMBIS URUETA, identificada con cedula de ciudadanía número 45.543.613 de Cartagena, autorizo y doy amplias facultades a la UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLIVAR para hacer uso de este trabajo de grado y publicarlo en el catalogo Online de la biblioteca.

---

Yady Del C. Lambis Urueta

C.C# 45.543.613 de Cartagena

Cartagena de Indias, septiembre de 2011

Señores

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR

Comité de evaluación de proyectos

La Ciudad.

Estimados Señores

De la manera más atenta me permito presentar a ustedes la monografía titulada: -  
“LABORATORIOS DE SIMULACION DE UN SISTEMA DE MULTIPLEXACION POR  
DIVISION DE FRECUENCIAS ORTOGONALES”, desarrollada por los estudiantes de la  
Especialización en telecomunicaciones, **YADY LAMBIS URUETA Y CHRISTIAN  
MAURICIO SIERRA TERAN.**

Considero este material de valiosa ayuda para el desarrollo de actividades en la  
asignatura de comunicaciones electrónicas y sistemas de modulación digital  
avanzada.

Atentamente

---

Gonzalo López Vergara

M Sc. Telecomunicaciones

Nota de Aceptación

---

---

---

---

---

---

Presidente del Jurado

---

Jurado

---

Jurado

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores del texto hacen un reconocimiento especial a cada una de las siguientes personas:

A DIOS y nuestros padres por su apoyo incondicional, incontables horas de traspaso, acompañamiento y respaldo emocional.

Al Ing. Gonzalo López Vergara, docente de la asignatura de comunicaciones, por su constante aporte, acompañamiento y correcciones en el desarrollo del trabajo y valiosas orientaciones.

Al Ing. Ricardo Arjona, por brindarme su respaldo en los momentos más difíciles.

Al Ing. Marco Abel Parra Guarín, docente de la asignatura de comunicaciones digitales, por haber estado suministrando información pertinente al proceso y al desarrollo de la simulación.

A Eve,  
Mi Brillante y hermosa madre  
sin quien yo nadie sería.  
Ella me da su amor y cariño siempre  
nunca se queja ni interfiere en nada  
no pide nada y lo da todo  
y además escribe mis dedicatorias

Nunca cesaremos de explorar  
Y el final de nuestras exploraciones  
Será llegar al lugar donde empezamos  
Y [entonces] conocerlo por primera vez  
**T. S. Eliot.**



## Tabla de contenido

AGRADECIMIENTOS .....	7
ABSTRACT .....	155
INTRODUCCION .....	166
1. MARCO TEORICO.....	177
1.1 Transmisión en paralelo .....	177
1.1.1 Degradación multipath o multi-trayectoria.....	177
1.2 Elementos de un sistema OFDM.....	211
1.3 Conversor serie/paralelo .....	211
1.4 Modulador .....	211
1.5 DFT (Transformada discreta de Fourier).....	211
1.6 Conversor Paralelo Serie .....	211
1.7 Transformada de Fourier para sistemas en tiempo discreto (DTFT).....	211
2. Principio de funcionamiento de un sistema OFDM .....	22
2.1 Frecuencias ortogonales en los subcanales de transmisión. ....	233
2.2 Intervalo de guarda .....	277
3. UNA BREVE DESCRIPCION DE OFDM .....	311
3.1 MARCO HISTÓRICO DE OFDM.....	322
3.2 Eficiencia espectral .....	322
3.3 Ventajas de la modulación OFDM.....	344
4. Sistemas de Modulación Digitales.....	355
4.1 Modulación en sistemas M-PSK.....	355
4.1.1 Sistema binario PSK, BPSK de modulación. ....	355
5. Modulador BPSK.....	366
5.1 Demodulador BPSK .....	377
6. LABORATORIO 1. Transmision de Señales con modulación BPSK .....	38
6.1 Transmisión de señales con modulación BPSK. ....	38
7. LABORATORIO 2 . REPASO MODULACIONES DIGITALES.....	400
7.1 LABORATORIO 3 CONCEPTO DE FRECUENCIAS ORTOGONALES	466

7.2	Procedimiento .....	488
8.	LABORATORIO 4 SISTEMA OFDM SIN IFFT.....	500
8.1	Procedimiento .....	500
9.	LABORATORIO 5 SISTEMA OFDM CON IFFT.....	522
9.1	Procedimiento .....	522
10.	SOLUCION A LABORATORIOS SELECCIONADOS .....	544
10.1	Laboratorio 1.....	544
10.2	Procedimiento.....	577
10.3	Procedimiento.....	59
10.4	Procedimiento.....	63
11.	APLICACIONES DE UN SISTEMA OFDM.....	655
12.	BIBLIOGRAFÍA.....	666

## Lista de Figuras

Figura 1. Principio básico de la propagación multipath .....	17
Figura 2. Respuesta típica al impulso de la degradación multipath: (a) en el dominio del tiempo; (b) en el dominio de la frecuencia.....	19
Figura 3. Sistemas de transmisión en paralelo. (a) Sistema multi-código. (b) Sistema multi-portadora .....	20
Figura 4. Sistema de Transmisión OFDM. (a) Transmisor, (b) receptor.....	22
Figura 5. Aprovechamiento del espectro gracias a la ortogonalidad de frecuencias. ....	23
Figura 6. Representación Grafica de las formas de onda en el tiempo de las portadoras ortogonales.....	25
Figura 7. Concepto de intervalo de guarda .....	29
Figura 8. Conformación de un símbolo OFDM .....	30
Figura 9. Formación del prefijo cíclico.....	30
Figura 10. Esquemas de multiplexación por división de frecuencia. (a) sin solapamiento (FDM) (b) con solapamiento (OFDM).....	33
Figura 11. Diagrama de Bloque de un sistema BPSK.....	36
Figura 12. Espectro de una señal BPSK .....	37
Figura 13. Diagrama de bloques de un demodulador BPSK.....	37
Figura 14. Suma de varios tonos igualmente espaciados .....	46
Figura 15. Constitución de los cuatro tonos .....	47

## **Lista de tablas**

Tabla 1. Sistema de Portadoras Ortogonales.....	24
Tabla 3. Resultado para frecuencias igualmente espaciadas .....	49
Tabla 4. Resultado para frecuencias irregularmente espaciadas.....	49
Tabla 5. Resultado para frecuencias igualmente espaciadas .....	58
Tabla 6. Resultado para frecuencias irregularmente espaciadas.....	58

## Lista de Laboratorios y Simulaciones en Vissim/Comm correspondientes

1. Transmisión de señales con modulación BPSK. <u>BPSK.vsm</u>	38
2. Repaso modulaciones digitales. a. Modulación ASK, Modulación FSK y Modulación PSK. <u>1_3-ask_fsk_psk_UTB.vsm</u> y <u>MPSK_modem.vsm</u>	40
b. Modulación MSK, <u>BFSK_mod.vsm</u> .	
c. Modulación QAM, <u>qam2.vsm</u>	
3. Concepto de frecuencias ortogonales <u>FSK_tones.vsm</u>	46
4. Sistema OFDM sin IFFT <u>OFDM_sinFFT.vsm</u>	49
5. Sistema OFDM con IFFT <u>OFDM.vsm</u>	51

## RESUMEN

Este proyecto se encarga de la simulación de un sistema de multiplexación por división de frecuencias ortogonales mediante la programación a través del software Vissim Comm® de cada una de sus etapas, para luego evaluar su desempeño, calculando y midiendo (en la simulación) su tasa de error de bits VER, con su respectiva curva BER vs SNR.

Así mismo se elaboran una serie de laboratorios para comprender el funcionamiento de los sistemas de frecuencias ortogonales y determinar cada una de sus propiedades como: eficiencia espectral, inmunidad a la multitrayectoria, entre otros.

A través de un laboratorio se compara un sistema que aplica IFFT a varios símbolos y sistemas de múltiples portadoras ortogonales, y se establece que ambos son equivalentes.

Palabras Clave: OFDM, Simulación, BER, relación señal a ruido, Vissim/Comm

## ABSTRACT

This Project is done to make the simulation of an Orthogonal Frequency Division Multiplexing through a model executed on Vissim/Comm of each one of its stages, so that we can evaluate its performance by calculating and measuring (on the simulation) its Bit Error Rate BER, and draw its correspondent curve BER vs SNR (Signal to Noise Rate).

Likewise, we make a set of laboratories in order to understand how Orthogonal Frequency Systems and OFDM works and establish each one of its properties such as: spectral efficiency, multipath degradation immunity, among others.

Along this project we have made several laboratories that make a comparison between a system that apply IFFT to different symbols and a system of multiple orthogonal carriers, and then establish that both systems are equivalent.

In order to establish the advantages of an OFDM system, we made a simulation with QPSK as a digital modulation scheme, and applying a transmission system of 8 parallel channels with a guard interval of 1 symbol/ 8 symbols in serial transmission.

Keywords: OFDM, Simulation, BER, Signal to Noise Rate, Vissim/Comm

## INTRODUCCION

En este documento se realiza la simulación de un sistema de OFDM con el fin de conceptualizar cada uno de sus elementos y resaltar su inmunidad frente a la degradación “multipath” o multi-trayectoria y a la interferencia intersimbólica, además de tolerar su eficiencia frente al ruido blanco en canales de radio.

Se escogió como tema a estudiar la transmisión OFDM por su conveniencia a la hora de realizar comunicaciones inalámbricas de alta velocidad y por su inmunidad frente a la interferencia intersimbólica ISI, además porque transforma altas velocidades de transmisión de datos en pequeñas tasas transmitidas en paralelo.

La razón por la cual OFDM es implementado en sistemas inalámbricos es debido a que la señal emitida, al recorrer varias trayectorias hasta llegar al punto final de recepción de datos y tomar varios tiempos en recorrer dichas trayectorias, el receptor detecta la llegada de varias copias de la misma señal, pero con diferentes retrasos, produciéndose un efecto indeseado: la interferencia intersimbólica y la degradación “multipath”

En el esquema de transmisión OFDM, una cantidad de subportadoras que presentan frecuencias ortogonales son transmitidas en paralelo, que al ser transmitidas en conjunto sobre un mismo canal, se observa un fenómeno particular, y es que la representación de la señal de cada uno de los canales en el dominio de la frecuencia se superponen entre sí a lo largo del ancho de banda de transmisión disponible. De este modo, la separación que existe entre las subportadoras (subcarriers) es tal que la eficiencia espectral es bastante alta, permitiéndose un sistema que no solo es inmune a degradaciones de la señal por efectos del canal, sino también un sistema de modulación cuyo aprovechamiento del ancho de banda es superior a esquemas de modulación clásicos (como QPSK y M-QAM).

En la actualidad los esquemas de transmisión OFDM son empleados en sistemas de difusión digital de video terrestre (DBV-T), radio digital (DAB), el protocolo de enlace ADSL (Cable para de la línea telefónica), CMODEM (cable TV), sistema de transmisión inalámbrica LAN (Redes inalámbricas de área local), MAN( Redes de área metropolitana),PAN (Redes Inalámbricas de Área Personal) WIMAX, telefonía móvil de cuarta generación (4G),entre otros.



# 1. MARCO TEORICO

## 1.1 Transmisión en paralelo

### 1.1.1 Degradación multipath o multi-trayectoria

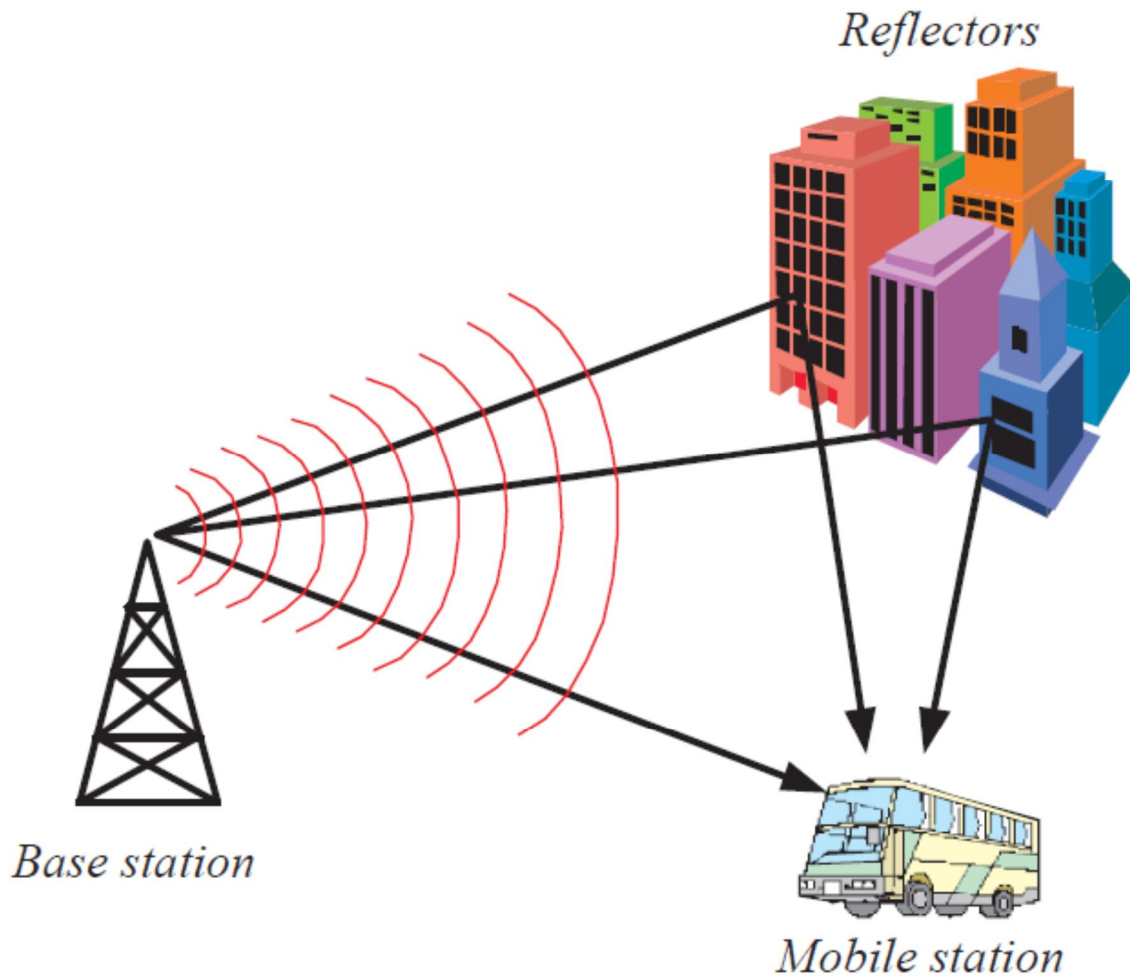


Figura 1. Principio básico de la propagación multipath

Para los entornos en los que se presenta degradación “multipath” (también conocida como degradación multi-trayectoria), tal como se ilustra en la Figura 1. en la que la señal que se envía se suma en desfase con copias de la misma señal que tomaron distintas trayectorias y presentaron un retraso entre sí, se genera una disminución de la amplitud de la señal resultante, deteriorándose la señal recibida, acarreando problemas con la recepción de datos.

Este problema ha de ser solucionado por varias maneras, entre ellas, implementando un ecualizador en el receptor, el ecualizador se encargará de devolverle la forma original a la señal distorsionada. Esta técnica implica utilizar técnicas complejas de ecualización adaptativas que estiman la respuesta al impulso del receptor y multiplican la señal de entrada por la conjugada compleja de dicha respuesta al impulso. Sin embargo, este método presenta bastantes inconvenientes en el momento de la implementación, debido a que se ha de utilizar un esfuerzo de procesamiento de señales superior que, después de todo, es complicado ejecutar a altas frecuencias -correspondientes a velocidades de transmisión de varios megabits por segundo-, con una alta velocidad, con un diseño compacto y de bajo costo de hardware. Por tal razón es imperativo encontrar un nuevo método para compensar la degradación "multipath": transmisión e paralelo.

Cuando se tiene en cuenta la transmisión de radio desde la perspectiva del dominio de la frecuencia, una parte de la señal puede tener interferencia constructiva e incrementar su nivel en la recepción, mientras que otra componente frecuencial puede ser afectada por interferencia destructiva, disminuyendo notablemente su nivel en la recepción, en algunas ocasiones eliminándose completamente la señal resultante a esa frecuencia.

Como es de saber, las bandas de frecuencia que se encuentran próximas sufrirán afecciones similares en cuanto al nivel de potencia de la señal, lo cual se encuentra altamente correlacionado.<sup>1</sup> El ancho de banda cuyas componentes frecuenciales poseen un alto valor de correlación se conoce como ancho de banda coherente.<sup>2</sup> Para banda angosta (Narrowband) normalmente la distorsión es minimizada si el ancho de banda de la señal es menor al ancho de banda coherente. Sin embargo, cabe resaltar que si el ancho de banda de la señal en cuestión ocupa un ancho de banda superior al ancho de banda coherente, esta señal estará sujeta a una mayor distorsión, aunque a pesar de todo, los niveles de potencia de la señal resultante no han de alterarse, aun si la señal está sujeta o no a altos niveles de degradación "multipath".

Para poder solucionar el problema anterior generado a causa de entornos susceptibles a generar degradación "multipath" y al mismo tiempo de transmitir datos de comunicaciones móviles en banda ancha (en lugar de banda angosta, Narrowband), se hace imprescindible implementar un sistema de transmisión en

---

<sup>1</sup> HARADA, Hiroshi y PRASAD, Ramjee. Simulación y Software de sistemas de radio para comunicaciones Móviles. Estados Unidos: Artech House. 2002.

<sup>2</sup> Prasad, Ramjee. Comunicaciones personales inalámbricas universales. Norwood, MA: Atech House. 1998

paralelo, en el que los datos transmitidos en alta velocidad son transportados a múltiples canales de baja velocidad de transmisión. Estos datos son multiplexados usando varias técnicas de multiplexación para distinguir en el receptor cada uno de los canales.

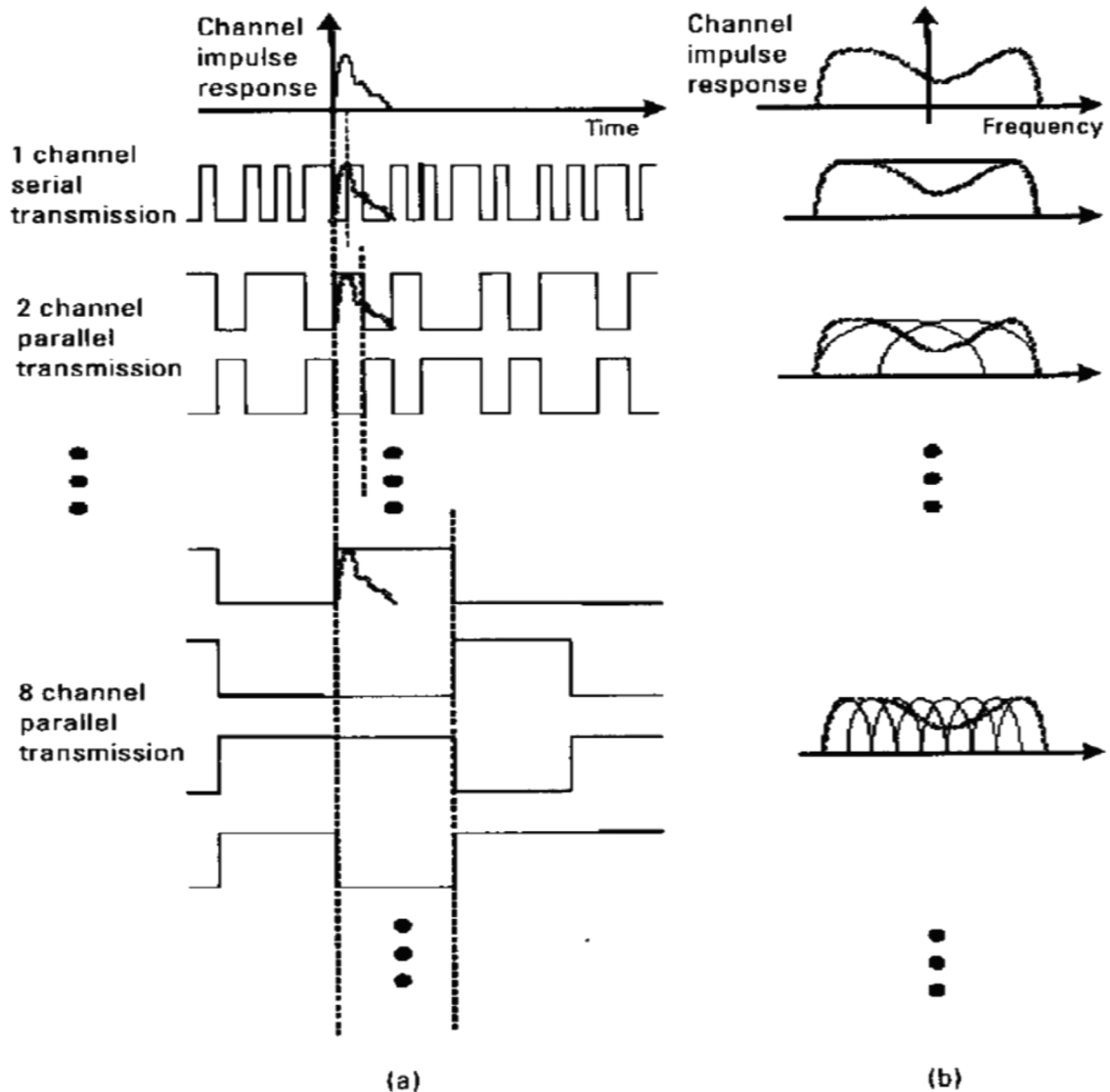


Figura 2. Respuesta típica al impulso de la degradación multipath: (a) en el dominio del tiempo; (b) en el dominio de la frecuencia

La Figura 2. ilustra los efectos de la transmisión en paralelo. Se puede apreciar que para una velocidad de transmisión de datos determinada, al incrementar el número de canales paralelos de transmisión se reduce la velocidad de datos a la cual cada subcanal paralelo debe trabajar, es decir, se incrementa la magnitud del

periodo de cada símbolo transmitido. Como resultado final, el tiempo de retardo de la onda retardada (en cada subcanal) queda restringido al orden del tiempo de un símbolo.

Con el fin de diferenciar otras técnicas similares de multiplexación de datos entre los subcanales, se citan a continuación las de mayor importancia:

Multiplexación por división de frecuencias. (FDM)

Multiplexación por división de código (CDM)

El primer método es también ampliamente conocido como transmisión multiportadora, y el segundo método como transmisión multicódigo.<sup>3</sup>

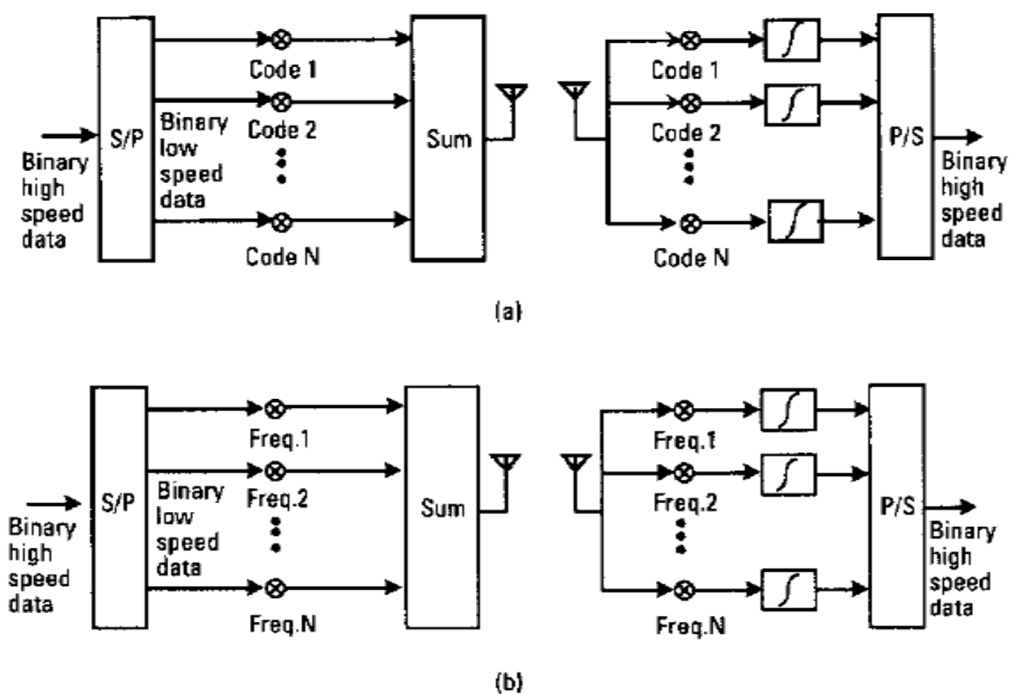


Figura 3. Sistemas de transmisión en paralelo. (a) Sistema multi-código. (b) Sistema multi-portadora

La Figura 3 muestra la configuración de los dos esquemas de transmisión. Se observará que OFDM es una técnica de transmisión multiportadora, y la más eficiente.

<sup>3</sup>HARADA, Hiroshi y PRASAD, Ramjee. Op. cit. p. 169

## **1.2 Elementos de un sistema OFDM**

### **1.3 Conversor serie/paralelo**

Acumula los datos muestreados en el tiempo, y los transmite en un bus paralelo, para que estos datos sean modulados con cada una de las señales subportadoras.

### **1.4 Modulador**

Es el sistema encargado de realizar la modulación de la señal digital a su equivalente representación compleja. Entre estos tenemos: QPSK, QAM, BPSK, entre otros.

### **1.5 DFT (Transformada discreta de Fourier)**

Se encarga de realizar la modulación con cada una de las señales subportadoras, de tal manera que el sistema tenga la mayor eficiencia espectral posible.

Es una forma cuantificada de crear las condiciones para que el sistema cumpla con la condición de tener frecuencias ortogonales y entonces poder transmitir su señal al medio (no sin antes aplicarle el intervalo de guarda)

### **1.6 Conversor Paralelo Serie**

Realiza el proceso inverso del conversor serie/paralelo, de tal manera que se puedan transferir los datos en forma serial, en igual cantidad al número de muestras tomadas en la etapa de discretización de la señal.

### **1.7 Transformada de Fourier para sistemas en tiempo discreto (DTFT)**

La transformada discreta de Fourier en tiempo discreto es la herramienta matemática que se utiliza para hallar los componentes frecuenciales de un sistema discreto.

## 2. Principio de funcionamiento de un sistema OFDM

El primer paso a ejecutar, es que los símbolos que son transmitidos a una alta velocidad, son transferidos a un convertidor serie/paralelo de N subcanales. Entonces, los datos que resultan de cada subcanal, pueden o no ser modulados por cualquier técnica de modulación digital (FSK, ASK, QPSK, QAM). Finalmente los datos modulados (o no modulados) son transferidos a un operador que realice la *Transformada Discreta de Fourier Inversa* correspondiente a cada uno de los subcanales –en este caso se implementa el algoritmo de la *Transformada rápida inversa de Fourier IFFT*-, donde finalmente la señal OFDM es generada.

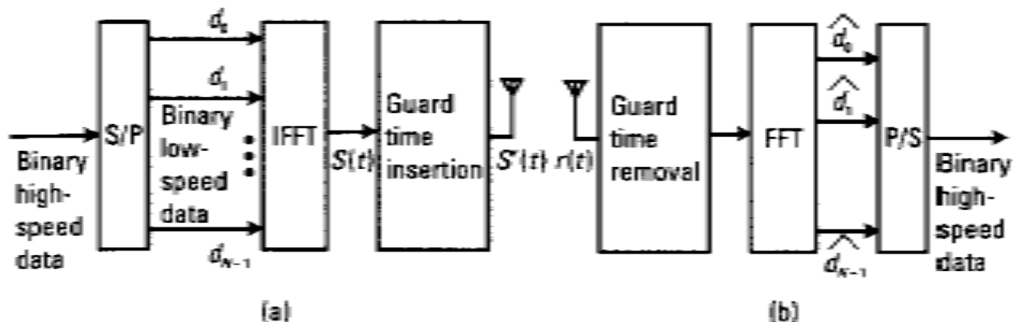


Figura 4. Sistema de Transmisión OFDM. (a) Transmisor, (b) receptor.

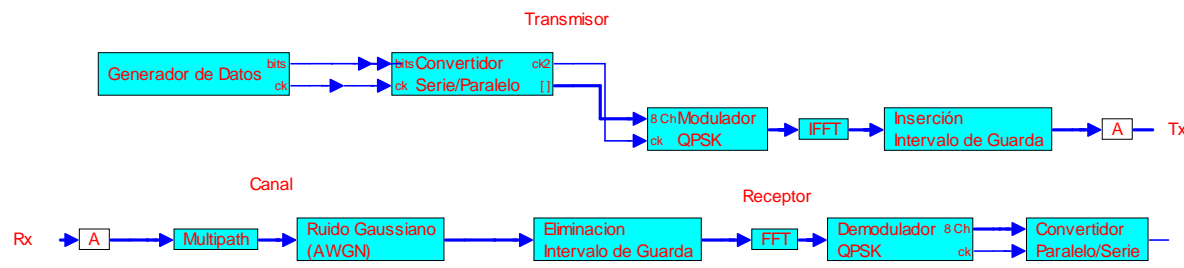


Figura 5. Diagrama de Bloques de un Sistema OFDM.

La Figura 4. y Figura 5. muestra el esquema básico descrito anteriormente, con cada uno de los componentes de la transmisión y recepción en la técnica OFDM, se puede observar cada uno de los elementos del circuito y los datos en la entrada pueden ser inclusive un corro de bits de alta velocidad, para luego demultiplexarse en registros con salida en paralelo, cuyas salidas se representan con las letras  $d_0, d_1, d_2 \dots d_{N-1}$ , donde la señal  $d$  puede ser tanto un bit, como un símbolo o un numero complejo, al cual se le es aplicada la transformada rápida de Fourier

inversa, resultando así la señal  $S(t)$  a la que luego se le aplica un algoritmo de inserción de tiempo de guarda, que finalmente produce la señal a transmitir.

## 2.1 Frecuencias ortogonales en los subcanales de transmisión.

Como se mencionó anteriormente, para que las señales puedan ser transmitidas en un ancho de banda determinado, y aprovechando al máximo el espacio frecuencial disponible en el espectro (eficiencia espectral), es necesario que las señales de las subportadoras se traslapen en frecuencia sin afectarse entre sí, pero para ello es suficiente que las frecuencias de los canales sean linealmente independientes (es decir, ortogonales).

La forma matemática de expresar lo anterior es utilizando la expresión a continuación

$$\int_{T_0}^{T_0+t} f_1(t) f_2(t) dt = 0 \quad \text{Ecuación 1.}$$

Donde las expresiones  $f_1(t)$  y  $f_2(t)$  representan a las frecuencias de las subportadoras.

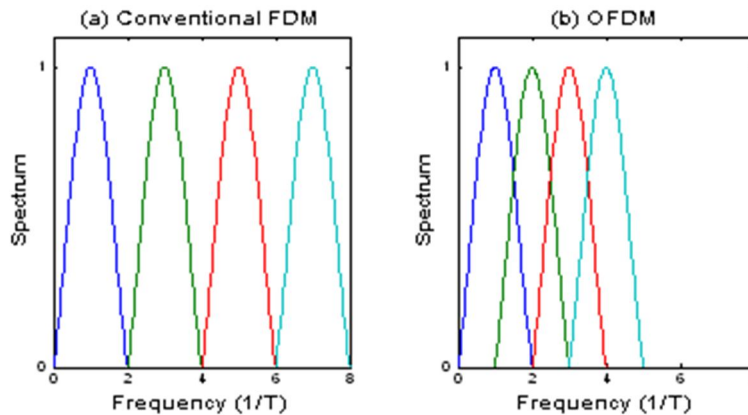


Figura 6. Aprovechamiento del espectro gracias a la ortogonalidad de frecuencias.

En tal caso se cumpla con la condición de la ecuación de ortogonalidad de frecuencias, entonces se pueden transmitir los datos superponiéndose en el dominio de la frecuencia, tal como se aprecia en la Figura 6.

La simplificación de la ecuación de ortogonalidad entre frecuencias de las subportadoras se reduce a que exista un espaciado entre ellas de  $1/T_s$ , donde  $T_s$  es el tiempo de un símbolo.

Para demostrar este hecho se ha tomado un conjunto de portadoras que tengan un espaciado de frecuencia constante entre ellas, y luego se ha evaluado la ortogonalidad existente entre ellas.

De esta forma se ha creado un sistema de 8 portadoras con una frecuencia de 1Hz hasta 8Hz, tal como se ve en la tabla.

**Tabla 1. Sistema de Portadoras Ortogonales**

<b>Portadora</b>	<b>Frecuencia</b>
<b>1</b>	1Hz
<b>2</b>	2Hz
<b>3</b>	3Hz
<b>4</b>	4Hz
<b>5</b>	5Hz
<b>6</b>	6Hz
<b>7</b>	7Hz
<b>8</b>	8Hz



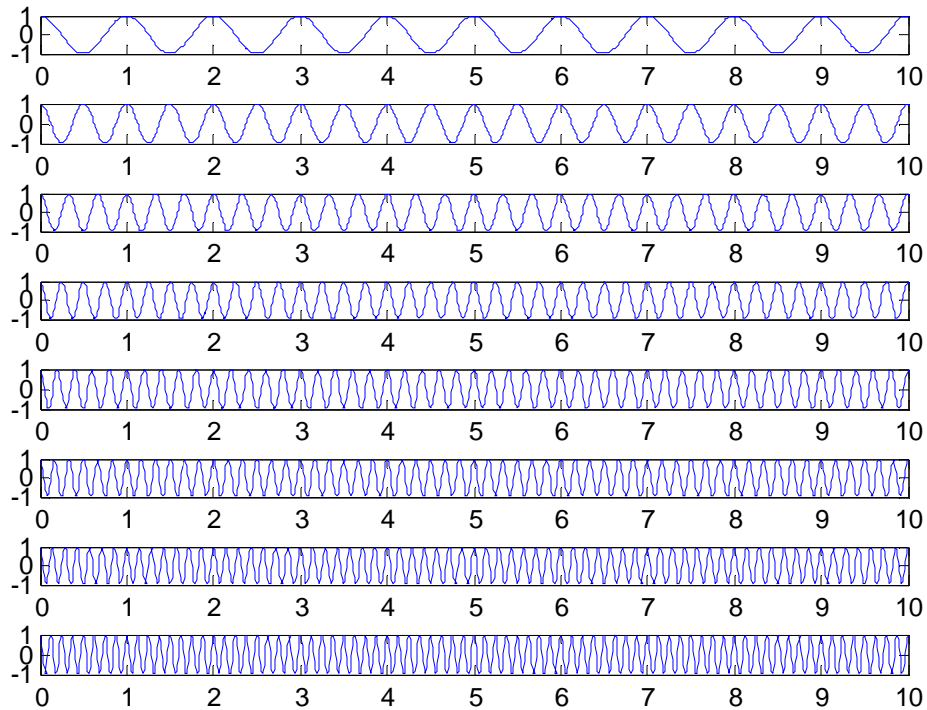


Figura 7. Representación Gráfica de las formas de onda en el tiempo de las portadoras ortogonales.

En la tabla 1 y la Figura 6, se puede apreciar como tal, el sistema de portadoras con un espaciado en frecuencias constante y con una diferencia de 1Hz entre ellas.

Como se ha de entender la forma de evaluar la ortogonalidad del sistema es a través de la Ecuación 1. En donde en este caso se tendría la ecuación siguiente:

$$\int_0^1 \cos(2 * \pi * n_1 * f_1 * t) * \cos(2 * \pi * n_2 * f_1 * t) dt \quad \text{Ecuación 2}$$

En este caso la ecuación 2 muestra la independencia existente entre una portadora y otra, dado que para cualquier valor entero de  $n_1$  y  $n_2$  el resultado siempre ha de ser 0.

El siguiente código en MATLAB ilustra de manera más profunda el procedimiento.

```
t=linspace(0,10,1000);
f=1;
y1=cos(2*pi*f*t);
y2=cos(2*pi*2*f*t);
y3=cos(2*pi*3*f*t);
y4=cos(2*pi*4*f*t);
y5=cos(2*pi*5*f*t);
y6=cos(2*pi*6*f*t);
y7=cos(2*pi*7*f*t);
y8=cos(2*pi*8*f*t);

subplot(8,1,1)
plot(t,y1)
subplot(8,1,2)
plot(t,y2)
subplot(8,1,3)
plot(t,y3)
subplot(8,1,4)
plot(t,y4)
subplot(8,1,5)
plot(t,y5)
subplot(8,1,6)
plot(t,y6)
subplot(8,1,7)
plot(t,y7)
subplot(8,1,8)
plot(t,y8)

trapez(y1.*y2)
trapez(y1.*y3)
trapez(y1.*y4)

trapez(y1.*y5)
trapez(y1.*y6)
trapez(y1.*y7)
trapez(y1.*y8)

trapez(y2.*y3)
trapez(y2.*y4)
trapez(y2.*y5)
trapez(y2.*y6)
trapez(y2.*y7)
trapez(y2.*y8)

trapez(y3.*y4)
trapez(y3.*y5)
trapez(y3.*y6)
trapez(y3.*y7)
trapez(y3.*y8)

trapez(y4.*y5)
trapez(y4.*y6)
trapez(y4.*y7)
trapez(y4.*y8)

trapez(y5.*y6)
trapez(y5.*y7)
trapez(y5.*y8)

trapez(y6.*y7)
trapez(y6.*y8)
```

Cuando se hace referencia a frecuencias ortogonales, se indica que existe una relación matemática especial entre todas las portadoras del sistema que permite que la información sea recuperada a pesar de que en el dominio de la frecuencia, los canales se superpongan, aspecto que no es posible realizar en un sistema FDM, dado que la señal es recuperada por medio de la implementación de filtros y demoduladores convencionales.

Para entender más el contexto matemático, se ilustra a continuación el siguiente caso:

Luego de tomar la señal de información digital que ha de ser transmitida y transferida a N canales paralelos, se le ha de aplicar un esquema de modulación, bien sea M-PSK o M-QAM, en donde se toma a T como el intervalo en el tiempo en el que se transmite un símbolo en cada uno de los N subcanales paralelos, en

este orden de ideas si se emplea una modulación QPSK, el valor de  $T$  corresponde al tiempo de transmisión de dos bits por cada subcanal y por ende, al tiempo de 16 bits en el canal principal en tal caso sean 8 canales paralelos.

$$\{s_i\} = \{s_{I_i} + js_{Q_i}\}, i = 0, 1, 2 \dots, (N - 1) \text{ Ecuación 3.}$$

La representación fasorial de la modulación M-PSK y M-QAM se puede apreciar en (11), que expresan el desfase y amplitud de la onda sinusoidal de cada uno de los  $N$  símbolos de los  $N$  canales paralelos del sistema.

$$\tilde{s}(t) = \sum_{i=0}^{N-1} s_i e^{j2\pi f_i t} = \sum_{i=0}^{N-1} s_i \phi_i(t), 0 \leq t < T \text{ Ecuación 4.}$$

En donde,

$$\phi_i(t) = \begin{cases} e^{j2\pi f_i t}, & 0 \leq t < T \\ 0, & \text{enotro caso} \end{cases} \text{ Ecuación 5.}$$

Para el caso en el que se quiera evaluar la función  $\tilde{s}(t)$  de (12), en un dominio finito, es decir si se quieren evaluar muestras de dicha función, entonces (12) Ecuación 4 se reduce a la que se puede apreciar a continuación en (14).

$$S_k = \sum_{i=0}^{N-1} s_i e^{j2\pi f_i \frac{kT}{N}} \text{ Ecuación 6.}$$

Dado que la condición suficiente para que el sistema presente frecuencias ortogonales, conforme a lo que se plantea en (10) es que el espaciado entre cada una de las frecuencias  $f_i$  sea  $1/T$ , se implementa un sistema en el que  $f_i = i/T$  y  $f_0 = 0$ , dando como resultado a (15).

$$S_k = \sum_{i=0}^{N-1} s_i e^{j2\pi \frac{ki}{N}} \text{ Ecuación 7.}$$

Comparando los resultados anteriores, y sobretodo el de (15) con la definición de la transformada inversa de Fourier, se puede observar que las definiciones son idénticas y que modular el sistema en frecuencias ortogonales, matemáticamente hablando, no es más que aplicar un algoritmo de IFFT o FFT en el sistema.

## 2.2 Intervalo de guarda

En la simulación, una de las formas de reducir los efectos de la interferencia intersimbólica (ISI) es mediante la creación de un intervalo de guarda extendido, donde cada símbolo de OFDM esta antecedido por una extensión periódica de su

propia señal. Al final, la duración total del símbolo estará expresada por  $T_{total} = T_g + T_s$ . Donde  $T_g$  es el tiempo que corresponde al tiempo de guarda.

De esta forma Wikipedia hace una explicación interesante

“Si en una transmisión OFDM nos fijamos en dos símbolos próximos, símbolo  $n$  y símbolo  $n+1$  en el dominio del tiempo, primero transmitimos el símbolo  $n$  y cuando hemos acabado, empezamos a transmitir el símbolo  $n+1$ . Si debido a ecos por múltiples trayectos se generan diferentes trayectorias en el receptor, recibiremos los símbolos tantas veces como trayectorias lleguen. La primera señal recibida será la que realice la trayectoria más directa entre el emisor y el receptor, y a consecuencia tendrá el mínimo retraso respecto a la señal emitida. El receptor coge el símbolo y lo demodula en el momento de empezar la demodulación del siguiente símbolo  $n+1$ , con lo cual que el receptor se encontrará interferencias debidas a la recepción de partes del símbolo  $n$  que han llegado mas tarde por otros trayectos. Con el fin de evitar este tipo de interferencias, en el emisor se inserta un intervalo de tiempo después de la transmisión de cada símbolo, denominado intervalo de guarda. Durante este tiempo el receptor ignorará las señales recepcionadas. Este tiempo del intervalo de guarda tiene que ser superior al máximo retraso que se produzca por múltiplos trayectos, pero tiene que ser inferior al tiempo que dura un símbolo. Con eso evitaremos las interferencias.”<sup>4</sup>

El intervalo de guarda es conocido como un a extensión cíclica formada por un prefijo cíclico, tal como se aprecia en Figura 8. y Obsérvese como, efectivamente un número de muestras en el inicio de la trama es repetido continuamente.

Si bien, la extensión cíclica tiene como objetivo la reducción de la interferencia intersimbólica, previniendo la interferencia en el tiempo entre símbolos consecutivos, de hecho, si el periodo del intervalo de guarda es grande en comparación con el máximo tiempo de retardo de la señal, la ISI puede ser anulada casi completamente.

---

<sup>4</sup> COFDM <http://es.wikipedia.org/wiki/COFDM>

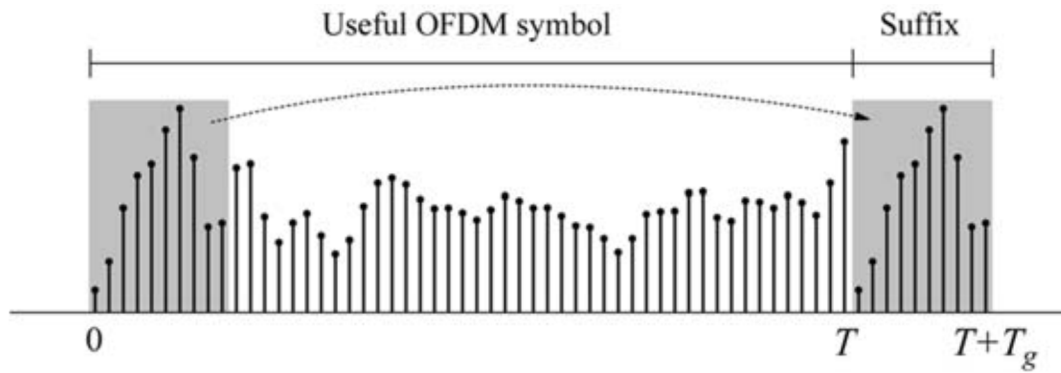


Figura 8. Concepto de intervalo de guarda

Una desventaja de usar una extensión cíclica es la reducción en la eficiencia de potencia del sistema, debido a que una fracción de la energía total del sistema es empleada en la transmisión de esta señal redundante. Otra desventaja es la reducción en la eficiencia espectral<sup>5</sup>.

---

<sup>5</sup> GUIMARÃES, Dayan Adionel. Digital Transmission, A simulation Aided introduction with Vissim/Comm. Brasil: Instituto Nacional de Telecomunicaciones (Inatel). p. 651.

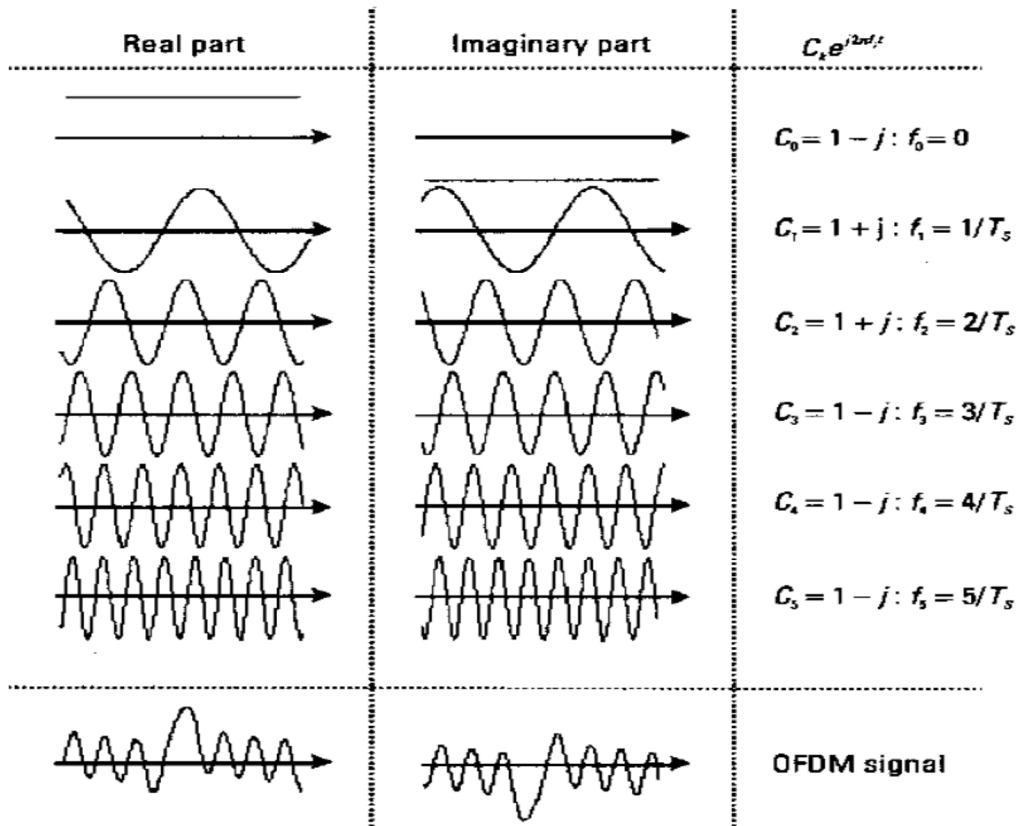


Figura 9. Conformación de un símbolo OFDM

Como se puede observar en la Fig. 7. el símbolo OFDM está conformado por la modulación digital (ya sea MPSK o MQAM) de cada una de las salidas del convertidor Serie/Paralelo, cuyas frecuencias en las portadoras son ortogonales.

En este caso, lo que se hace para agregar el prefijo cíclico, es agregar en el inicio de cada símbolo, la parte final del mismo.

La señal resultante OFDM es la parte real de la figura 7, con adición del prefijo cíclico, tal como se ve en la figura 8.

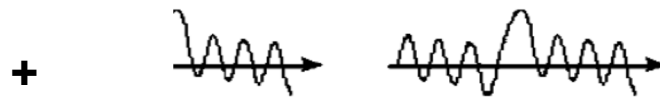


Figura 10. Formación del prefijo cíclico.

### 3. UNA BREVE DESCRIPCION DE OFDM

A lo largo de estos últimos años, ha incrementado el interés sobre disponer servicios que se encuentran disponibles en redes públicas de medios guiados a los distintos tipos de redes de medios no guiados, y posiblemente a usuarios móviles. En el pasado reciente (como ejemplo en los sistemas celulares 1G y 2G), además de servicios de voz, en estas redes solo se pueden suministrar servicios que demanden una velocidad de transmisión de datos baja para enviar dicha trama a usuarios móviles. No obstante, ya existen altas demandas de implementación de sistemas de comunicación multimedia a través de redes inalámbricas tanto en el sector privado como en el sector público y es importante tener en cuenta que, como lo enuncia Prasad<sup>6</sup>, “Las redes cableadas no pueden soportar extensiones a redes móviles debido a que los canales de radio móviles están más contaminadas que los canales de transmisión de datos de las redes cableadas”. Tampoco es posible preservar la calidad de servicio (QoS) requerida en estas redes.<sup>7</sup>

El canal de radio móvil se caracteriza por recepciones de varias rutas que asumen las ondas electromagnéticas que viajan a lo largo del trayecto, esto es conocido en inglés como “multipath” y radica en el hecho en que la señal que llega al receptor no solo es producto de la recepción de la onda de radio por línea de vista (LOS, Line of sight), sino que también corresponde a la sumatoria del total de copias de la onda que viajan en distintas rutas por el fenómeno de la reflexión y que toman caminos que pueden ser de distintas longitudes por lo que se presentan retrasos entre estas ondas. Dichos retrasos entre las ondas que componen la onda resultante, generan un fenómeno conocido como interferencia intersimbólica (ISI), que finalmente causa grandes degradaciones al desempeño de la red, el propósito de este trabajo es ilustrar como se pueden disminuir tales efectos mediante el diseño de un sistema que sea inmune a dichos fenómenos.

---

<sup>6</sup> PRASAD, Ramjee. OFDM for Wireless Multimedia Communications, Norwood, MA: Artech House, 1999. p. 11

<sup>7</sup> L. M., Correia, and PRASAD, R. “An Overview of Wireless Broadband Communications,” IEEE Communications Magazine, Vol. 35. 1997, pp. 28–33.

### 3.1 MARCO HISTÓRICO DE OFDM

OFDM es un tipo especial de transmisión multiportadora, en donde un chorro de dato es transmitido en paralelo sobre un conjunto de subportadoras de baja velocidad de transmisión. Vale la pena mencionar que OFDM no solo es un esquema de multiplexación de datos, sino que también puede ser interpretado como una técnica de modulación.

Los conceptos fundamentales implementados en OFDM son la transmisión en paralelo y la multiplexación por división de frecuencia (FDM), los cuales fueron desarrollados a mediados de los años 60.<sup>8</sup> Algunos desarrollos precursores de esta técnica fueron desarrollados en los años 50s, sin embargo fue solo hasta enero de 1970 en que se logró enlistar, completar, archivar en las patentes estadounidenses.

En los años 60s, la técnica de multiplexación OFDM fue usada en diversos sistemas militares de alta frecuencia tales como KINEPLEX, ANDEFT, y KATHRYN. Por ejemplo, la velocidad señalización de un modem de datos en KATHRYN estaba diseñada para una banda de alta frecuencia. Se usaron en ese momento, un conjunto de 34 canales paralelos de baja frecuencia modulados en fase, con un espaciado en frecuencia de 82 Hz. En un sistema clásico de transmisión de datos en paralelo, la banda de frecuencia total está dividida en  $N$  subcanales no traslapados en frecuencia. Cada subcanal está modulado por portadoras distintas, por lo que los  $N$  subcanales están multiplexados en frecuencia.

### 3.2 Eficiencia espectral

A primera vista parece ser conveniente, al igual que en FDM, que en la representación en el dominio de la frecuencia los canales no se traslapen, para que la información sea recuperable y que no se presenten interferencias entre canales. Sin embargo, desde el paradigma de transmisión OFDM el hecho de que dichos canales no se traslapen en frecuencia conduce a una utilización ineficiente

---

<sup>8</sup> Chang, R. W., "Synthesis of Band Limited Orthogonal Signals for Multichannel Data Transmission," Bell Syst. Tech. J., Vol. 45, December 1966, pp. 1775–1796.



del espectro disponible, debido a que, la información puede ser recuperable en tal caso las frecuencias de las portadoras sea ortogonal.

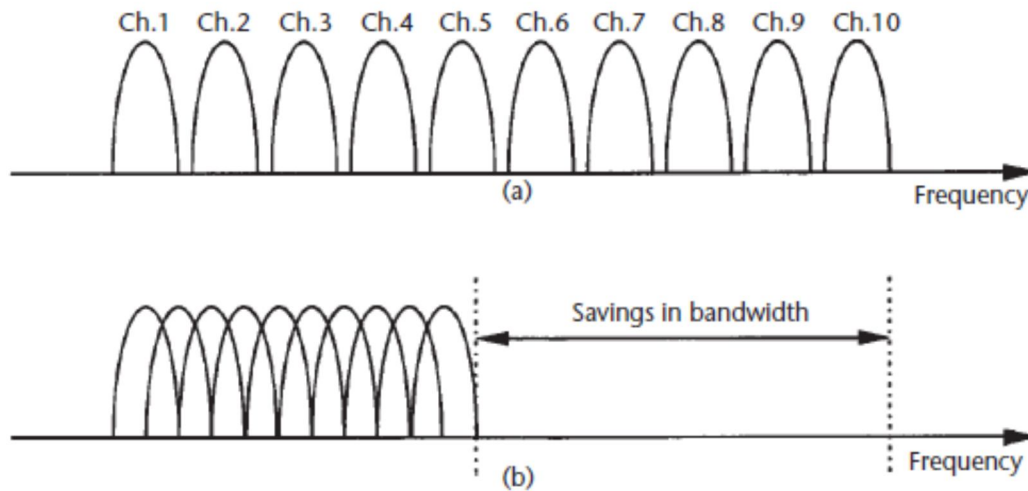


Figura 11. Esquemas de multiplexación por división de frecuencia. (a) sin solapamiento (FDM) (b) con solapamiento (OFDM)

La Figura 11. ilustra la diferencia entre la multiplexación y distribución de canales convencional –en el que no se presentan traslapes en el espectro entre canales- y la multiplexación en OFDM. Se puede ver claramente que para el uso de la técnica de multiportadoras traslapadas, se puede ahorrar hasta casi un 50% del ancho de banda. No obstante, para ejecutar esta técnica, se necesita reducir la diafonía o interferencia entre subportadoras, lo que implica el hecho de que las frecuencias de dichas portadoras deban ser ortogonales y en perfecta sincronización.

En la década de los 80s, la modulación OFDM fue estudiada para módems de alta velocidad, comunicaciones digitales y grabaciones de alta densidad. Uno de los sistemas que fueron empleados para la ejecución de multiplexación OFDM fue uno que implementaba un sistema QAM (como esquema de modulación digital) y un módulo de Transformada de Fourier (DFT).<sup>9</sup> También se pudo implementar OFDM por medio de un tono piloto, portadoras estabilizadas, un control de frecuencia de reloj y modulación por código enrejado (trelliscode). Además, varios módems de gran velocidad fueron desarrollados para las redes telefónicas.

---

<sup>9</sup>HIROSAKI, B., "An Orthogonally Multiplexed QAM System Using the Discrete Fourier Transform," IEEE Trans. Communications, Vol. COM-29, July 1981, pp. 982–989.

En los años 90, la técnica OFDM fue estudiada e implementada para aplicaciones de transmisión de datos en banda ancha sobre canales de radio móviles FM, como también en HDSL, ADSL, VDSL, DAB y CMODEM y la radiodifusión de televisión de alta definición (HDTV broadcasting)

### 3.3 Ventajas de la modulación OFDM

El esquema de transmisión OFDM tiene las siguientes ventajas:

- Es una forma eficiente de contrarrestar los efectos negativos de la degradación “multipath”, pues el sistema es mucho menos complejo que trabajar con un sistema conformado por una sola portadora y un ecualizador adaptativo.
- En canales de baja variación en el tiempo, es posible mejorar significativamente la capacidad mediante la adaptación de la velocidad de transmisión de datos en cada subportadora de acuerdo con la relación señal a ruido de cada subportadora.
- OFDM es una técnica robusta que está protegida de interferencia en banda angosta, pues dicha interferencia solo afecta un pequeño porcentaje de las subportadoras.
- OFDM hace posible la existencia de redes de una sola frecuencia, lo cual es bastante atractivo para aplicaciones de difusión (broadcasting)

Por otro lado, la técnica OFDM también tiene algunos inconvenientes si se compara con modulación de una sola portadora.

- ✓ Es más sensible a niveles de offset en frecuencia y ruido en la fase.
- ✓ Tiene una relación de potencia pico a potencia promedio relativamente alta, lo que hace que tienda a reducir la eficiencia de potencia del amplificador de radio frecuencias. Esto sucede debido a que en la transmisión luego de aplicada la transformada rápida de Fourier inversa, la forma de onda resultante tiene un comportamiento cuyo rango de valores de elongación es relativamente grande, requiriendo el uso de amplificadores lineales donde impere una alta precisión.

De lo anterior podemos concluir que OFDM tiene modulación multiportadora ya que posee más de 2.000 portadoras en cada canal de TV de 6MHz, tiene una duración mayor de la longitud de símbolos comparado con un sistema de transmisión de una portadora. La modulación/demodulación son procesados por IFF/FFT.

## 4. Sistemas de Modulación Digitales

A lo largo del estudio de sistemas de transmisión de señales digitales, se encuentra el siguiente modelo de energía de transmisión de un bit en sistemas de modulación sinusoidal.

$$z(t) = \sqrt{\frac{2\xi}{T}} \cos(2\pi f_c t) \quad 0 \leq t \leq T \quad \text{Ecuación 8}$$

En donde  $f_c$  es un múltiplo entero de  $1/T$ . El uso de esta notación favorece la identificación de la energía de onda del símbolo. Que en este caso corresponde a  $\xi$ .

$$\begin{aligned} E_z &= \int_0^T z^2(t) dt = \frac{2\xi}{T} \int_0^T \cos^2(2\pi f_c t) dt = \frac{2\xi}{T} \int_0^T \left\{ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos(4\pi f_c t) \right\} dt \\ &= \xi + \underbrace{\frac{\xi}{T} \int_0^T \cos(4\pi f_c t) dt}_{\text{Cero}} = \xi \quad \text{Ecuación 9} \end{aligned}$$

La razón por la cual  $f_c$  deba ser un múltiplo entero de  $1/T$ , es porque se necesita que en el periodo de integración  $T$ , la señal  $\cos(4\pi f_c t)$  describa un número entero de ciclos, de tal manera que su integral sea nula.

### 4.1 Modulación en sistemas M-PSK

La familia de modulaciones lineales de fase M-arias, es tal vez la más utilizada en la práctica en los sistemas de comunicación digitales.

#### 4.1.1 Sistema binario PSK, BPSK de modulación.

En la modulación BPSK, la fase de una señal sinusoidal es alternada dependiendo del bit de entrada en la señal de información.

Las señales moduladas BPSK poseen únicamente dos fases, razón por la cual cada símbolo representa a un bit transmitido en la señal de información.

Un símbolo modulado en un sistema BPSK, está descrito mediante la siguiente ecuación.

$$s(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos[2\pi f_c t + (i - 1)\pi] \begin{cases} 0 \leq t \leq T_b \\ i = 1, 2 \\ f_c = n/T_b \end{cases} \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde  $E_b$  es la energía promedio de un bit,  $T_b$  es la duración de un bit y  $f_c$  es la frecuencia de la señal portadora. Si se quiere que las transiciones de fase ocurran en el mismo punto (es decir, de forma continua),  $f_c$  debe ser un múltiplo entero de  $1/T_b$ . No obstante, no es estrictamente necesario satisfacer esta condición.

Se puede observar a partir de (3) que  $s_1(t) = -s_2(t)$ , lo cual significa que la modulación BPSK trabaja como la combinación de dos señales en contrafase.

## 5. Modulador BPSK

La estructura de un modulador BPSK se aprecia a continuación.

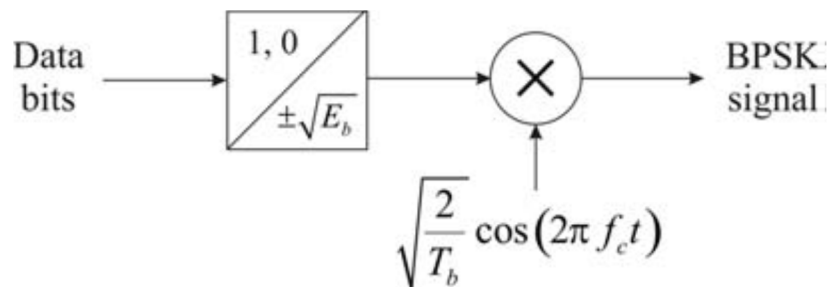


Figura 12. Diagrama de Bloque de un sistema BPSK

La entrada de datos que se aprecia, se encuentra codificada en NRZ, que representa un chorro de bits convencional, que es amplificado por  $\pm\sqrt{E_b}$  dependiendo del bit en la entrada.

La respuesta en frecuencia de una señal BPSK modulada es la que se observa a continuación.

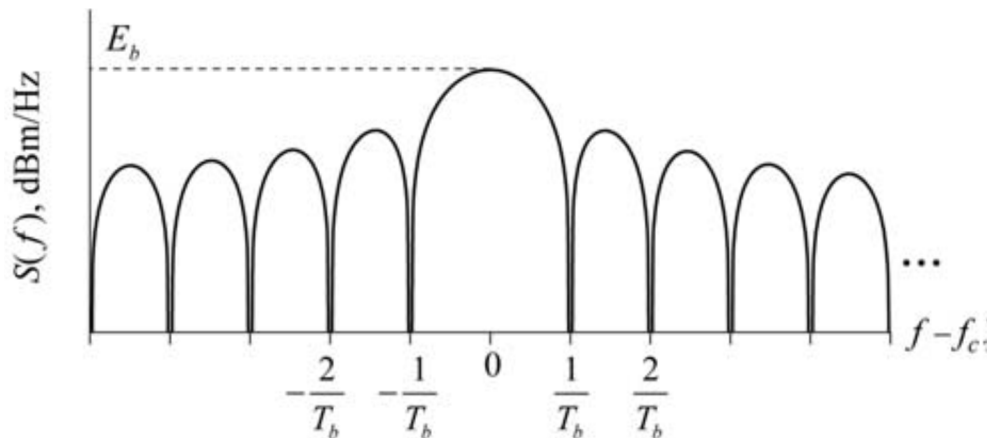


Figura 13. Espectro de una señal BPSK

Como se puede observar, el ancho de banda de una señal BPSK es  $2R_b$ , obsérvese bien la forma de la onda en el dominio de la frecuencia.

## 5.1 Demodulador BPSK

La figura 12 ilustra el proceso de recepción de la señal a través de un demodulador coherente, dado que se utiliza un oscilador de las mismas características del oscilador del modulador (frecuencia, magnitud y fase).

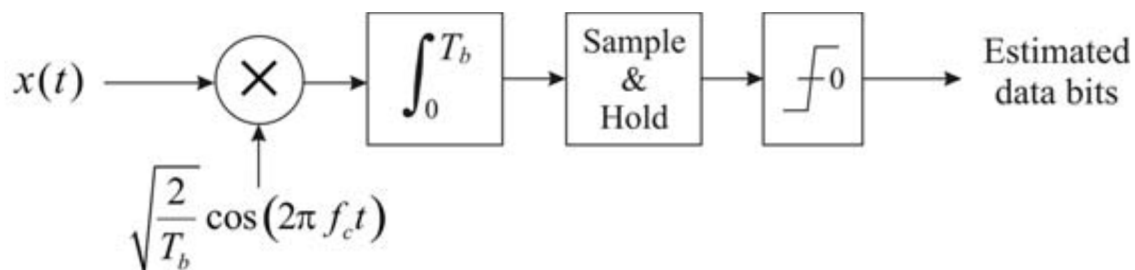


Figura 14. Diagrama de bloques de un demodulador BPSK

La función principal que ha de desempeñar el integrador es encontrar de que lado de la constelación se encuentra el bit.

Por su parte, el bloque de sample&hold y el comparador, se encargan de reconstruir la señal a partir del valor de la componente cosenoidal de la señal modulada.

Si está en el semieje negativo tomará un valor, si está en el semieje positivo, otro, tomando así valores binarios.

## 6. LABORATORIO 1. TRANSMISIÓN DE SEÑALES CON MODULACION BPSK

### 6.1 Procedimientos.

Este laboratorio se realiza con el fin de ilustrar el funcionamiento de un sistema de modulación BPSK.

Abra el archivo de simulación y siga la descripción.

Un chorro de bits aleatorio es generado a una velocidad de 1bit/seg, y alimenta al modulador BPSK, que está construido de acuerdo a la Fig. 1. La frecuencia de la portadora es 3Hz, y la fase inicial puede ser configurada por el usuario. La señal modulada es afectada por ruido gaussiano blanco (AWGN). Los valores de S/N son variados automáticamente, de tal manera que el desempeño del sistema sea analizado a través de una curva de BER.

La señal modulada BPSK también puede ser analizada a través de su descomposición en componentes frecuenciales PSD, y graficar su representación en frecuencia.

El receptor de la señal BPSK se ha construido de acuerdo a la fig. 2. El oscilador local también tiene 3Hz (con fase inicial modificable).

1. Abra el archivo **BPSK.vsm**
2. Diríjase al bloque **modulador BPSK**, y describa el comportamiento de la señal antes y después del bloque ( $1*2-1$ ).
3. ¿Cuál de las dos señales se considera **NRZ**? Justifique su respuesta.
4. ¿Cuál es el ancho de banda de la señal modulada BPSK? ¿Corresponde con la fig. 2? ¿El valor del ancho de banda es el mismo?
5. ¿Al analizar la señal a la salida del demodulador, cual es el desfase entre símbolos? ¿Cómo se logra realizar un desfase de  $180^\circ$  entre estos? Justifique.
6. Se está trabajando con una frecuencia de portadora de 3Hz, con una velocidad de bits de 1bps. ¿Qué sucede con la señal modulada si se modifica la frecuencia de la portadora a 1.1Hz? ¿La señal modulada es continua? ¿Esto afecta el BER?

7. Mida el BER al modificar dicho parámetro.
8. Observe la curva BER vs S/N. ¿La gráfica Teórica corresponde con la experimental?
9. Al modificar el ángulo de fase inicial **theta**, ¿Qué sucede con la curva experimental de BER?
10. Cuadruple el valor de la velocidad de transmisión de bits. ¿En que forma se ve afectada la amplitud de la señal modulada? Explique la razón por la cual esto sucede.
11. Confronte los resultados teóricos y experimentales de BER vs S/N, pruébelos en la simulación. Saque sus propias conclusiones.
12. Desactive el bloque de ruido Gaussiano **AWGN Channel**. Ahora diríjase al bloque **BPSK demod**, entonces observe la entrada y la salida del bloque **integrate and dump**, explique su comportamiento.
13. ¿Por qué se realiza un retraso en toda la simulación. Contemplado en los bloques **Delay(Tb sec)**? Explique con sus propias palabras.
14. Compruebe la validez de la formula de Probabilidad de error siguiente:

$$\begin{aligned}
 P_e &= \int_{\sqrt{E_b}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\pi N_0}} \exp\left(-\frac{x_1}{2N_0}\right) dx_1 \\
 &= \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{E_b}}{\sqrt{N_0/2}\sqrt{2}}\right)
 \end{aligned}$$

15. Compare esta expresión con el valor de VER.
16. Compare esta expresión también (modifique los valores de theta). Consigne valores es una tabla
17. Entre al bloque **cálculos** y mida el valor de potencia rms consumida por el sistema. ¿Qué relación existe entre la potencia promedio y la energía de un bit  $E_b$ ?
18. Realice un breve repaso de otros tipos de modulación digital básicos, entre al bloque **modulaciones** y compare el ancho de banda entre métodos, confronte con los valores teóricos.
19. En el sistema FSK, al modificar los valores de  $R_b$  y  $f_c$ , ¿se modifica el valor de la amplitud de la señal? Explique.

## 7. LABORATORIO 2 . REPASO MODULACIONES DIGITALES

### 1. MODULACION ASK

1.1. .-Abra y corra el archivo 1 3-ask fsk psk UTB.vsm . La velocidad de la señal binaria es \_\_\_\_\_bps. es un tipo de señal \_\_\_\_\_.El ancho de banda de esta señal es \_\_\_\_\_. La frecuencia de la portadora es \_\_\_\_\_.El ancho de banda de la señal modulada es \_\_\_\_\_.

### 2. MODULACION FSK

2.1 En el archivo anterior, en los bloques correspondientes a FSK, mida el ancho de banda de la señal FSK,\_\_\_\_\_, calcule el ancho de banda de la misma señal, aplicando la formula vista en la teoría,\_\_\_\_\_.

### 3. MODULACION PSK

3.1 Abra el archivo de la parte 1.1 y observe los cambios de fase de la señal PSK a la salida del modulador, determine en el ancho de banda de la salida\_\_\_\_\_.

Compárelo con el teórico.

Diligencie la siguiente tabla de acuerdo los resultados en 1,2 y 3.

TIPO DE MODULACION	VELOCIDAD DE ENTRADA	VELOCIDAD DE SALIDA	ANCHO DE BANDA
ASK			
FSK			
PSK			

CONCLUSIONES\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_



3.2. A continuación, estudiaremos los diferentes tipos de modulación M-PSK.

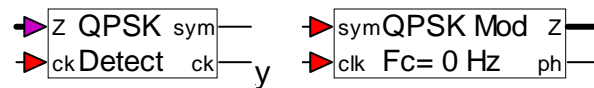
Abra el archivo MPSK\_modem.vsm.

Analice los diferentes bloques que conforman el circuito.

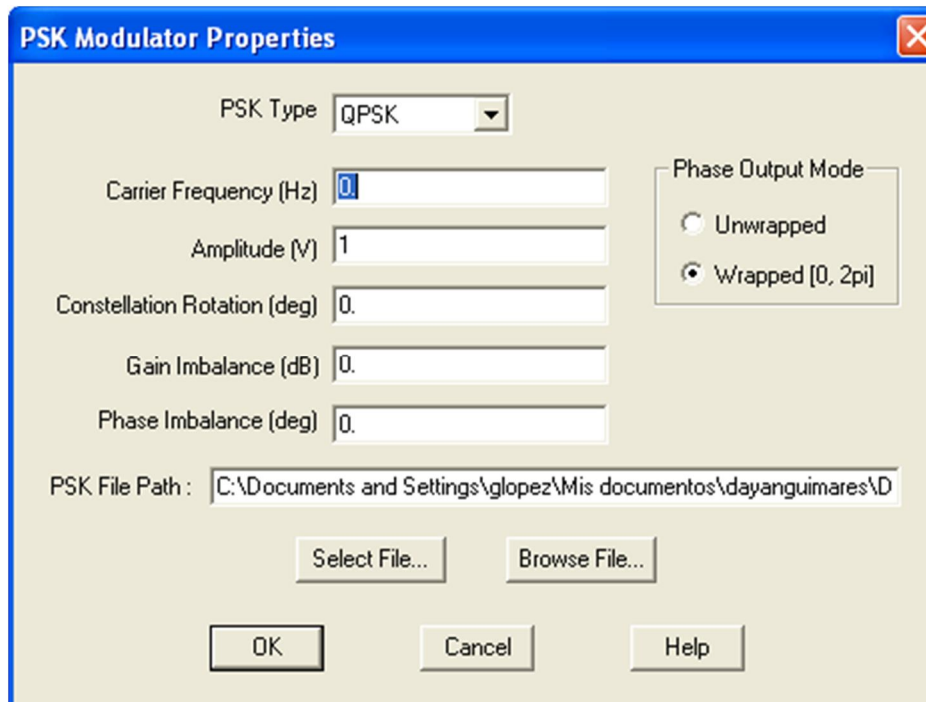
Con el clic derecho del ratón en el bloque **Configurable M**, se programan las diferentes modulaciones. Iniciaremos con QPSK.

Cuál es la velocidad del tren de bits de entrada? \_\_\_\_\_

Pulse en los bloques



Y aparece la ventana

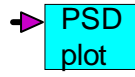


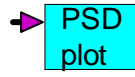
Haga clic en el botón Select File y ubique el archivo Psk\_Gray.dat en ambos.

Corra la simulación.

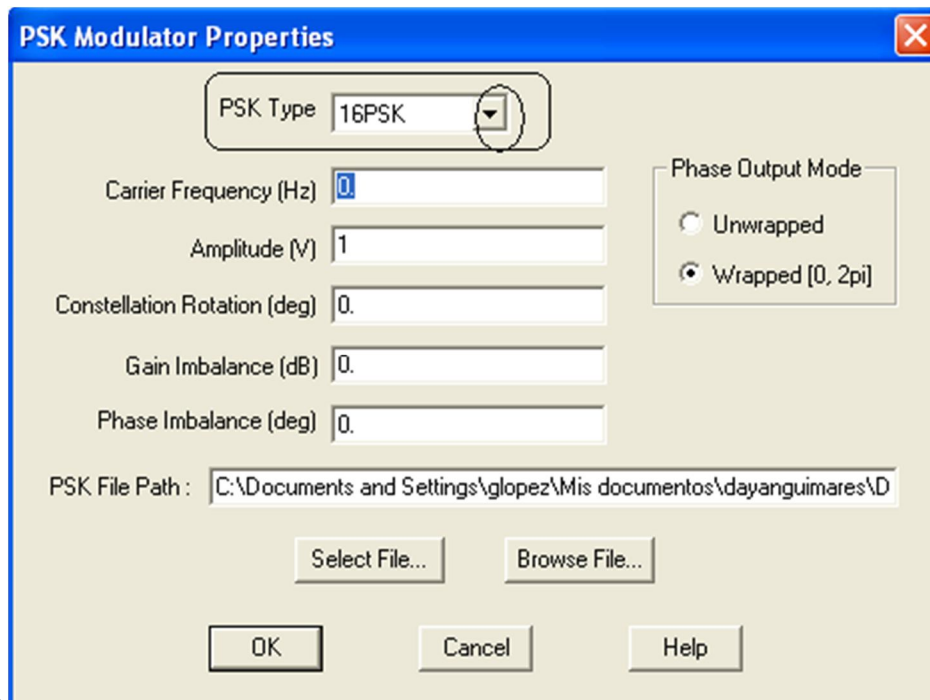
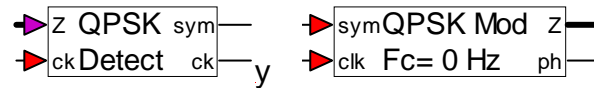
Cuántos puntos tiene el diagrama de constelaciones? \_\_\_\_\_

Cuántos bits se necesitan para codificar cada punto? \_\_\_\_\_.



En el bloque  mida el ancho de banda de la Modulación QPSK, \_\_\_\_\_. Compárelo con el teórico.

Realice el mismo procedimiento para las modulaciones 8-PSK, 16-PSK Y 32-PSK. Cada vez que configure una modulación debe programarla también en los bloques



Diligencie, la siguiente tabla.

TIPO MODULACION	PUNTOS CONSTELACION	NIVELES DE SEÑAL LA	ANCHO DE BANDA	BITS POR SIMBOLO

CONCLUSIONES \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

#### 4. MODULACION MSK

4.1. Abra el archivo BFSK \_mod.vsm, en la parte de arriba están los bloques para calcular las frecuencias de FSK( $f_1$  y  $f_2$ ) y  $\Delta F$ (Separación de frecuencias). Ud., debe comprobar las condiciones de  $f_1$  y  $f_2$  y  $\Delta F$ , para que no exista distorsión en la señal modulada FSK en los cambios de 1s y 0s.

Las condiciones para las frecuencias uno y dos es que deben ser de múltiplos enteros de  $1/4T$ ; donde T es el tiempo de bits de la señal de bandabase. La  $\Delta F$  debe ser múltiplo entero de  $1/2T$  y la frecuencia portadora debe ser múltiplo entero de  $1/2T$ .

Haga click derecho sobre el bloque FREQUENCY SEPARATION y observe las diferentes formas de salida de FSK, en los diferentes moduladores de FSK en la parte de abajo.

Observe las distorsiones en la onda modulada, cuando no se cumplen las condiciones antes mencionadas.

Cuando se cumplen estas condiciones tenemos la modulación MSK.

#### 5. MODULACION QAM

5.1 A continuación, estudiaremos los diferentes tipos de modulación M-QAM.

Abra el archivo gam2.vsm.

Analice los diferentes bloques que conforman el circuito.

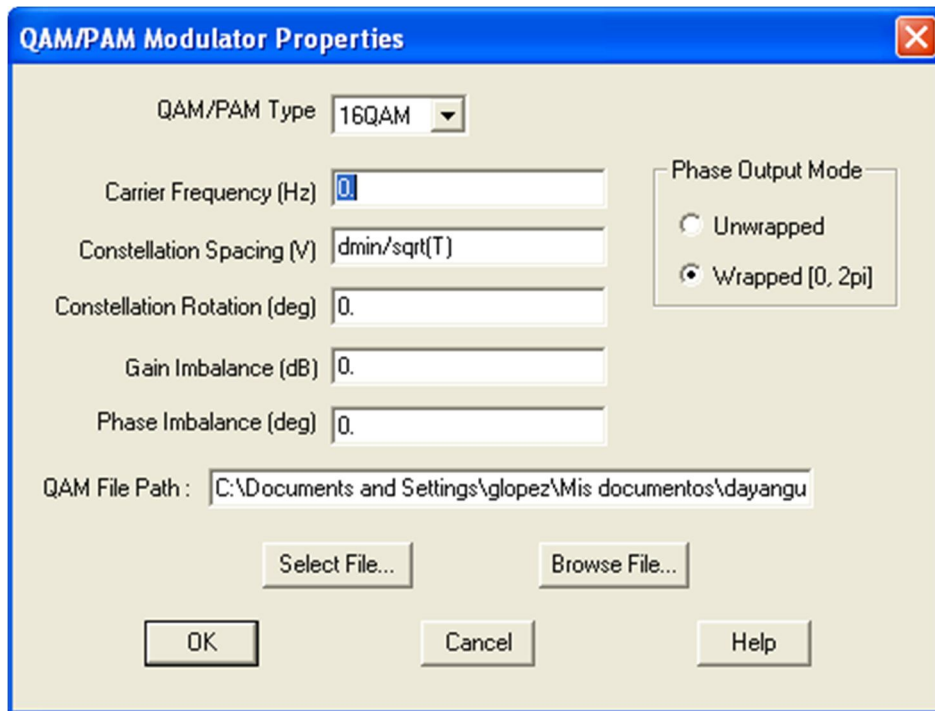
Con el clic derecho del ratón en el bloque **Configurable M**, se programan las diferentes modulaciones. Iniciaremos con QAM 16.

Cuál es la velocidad del tren de bits de entrada? \_\_\_\_\_

Pulse en los bloques



Y aparece la ventana



Haga clic en el botón Select File y ubique el archivo QAMmap.dat en ambos.

Corra la simulación.

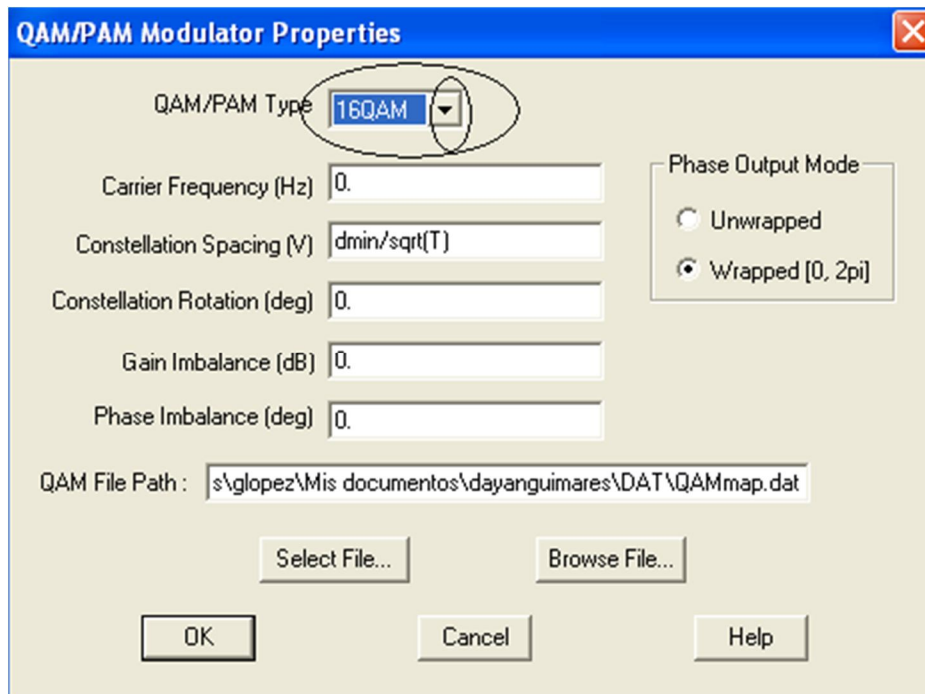
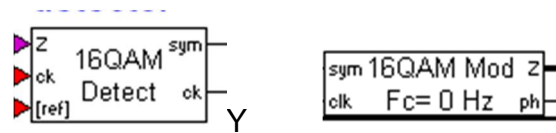
Cuantos puntos tiene el diagrama de constelaciones?\_\_\_\_\_

Cuantos bits se necesitan para codificar capa punto?\_\_\_\_\_.



En el bloque mida el ancho de banda de la Modulación QAM 16,\_\_\_\_\_.Compárelo con el teórico.

Realice el mismo procedimiento para las modulaciones 32-QAM,64-QAM, 128-QAM,256-QAM.Cada vez que configure una modulación debe programarla también en los bloques . Haga clic en ellos y aparecerá la siguiente ventana



Diligencie, la siguiente tabla.

TIPO MODULACION	PUNTOS CONSTELACION	NIVELES DE SEÑAL LA	ANCHO DE BANDA	BITS POR SIMBOLO

CONCLUSIONES \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

## 7.1 LABORATORIO 3 CONCEPTO DE FRECUENCIAS ORTOGONALES

Este laboratorio tiene como objetivo comprender el funcionamiento e importancia de las frecuencias ortogonales en un sistema OFDM.

Para ello se emplea un sistema de varios tonos y se realiza una correlación entre sus componentes.

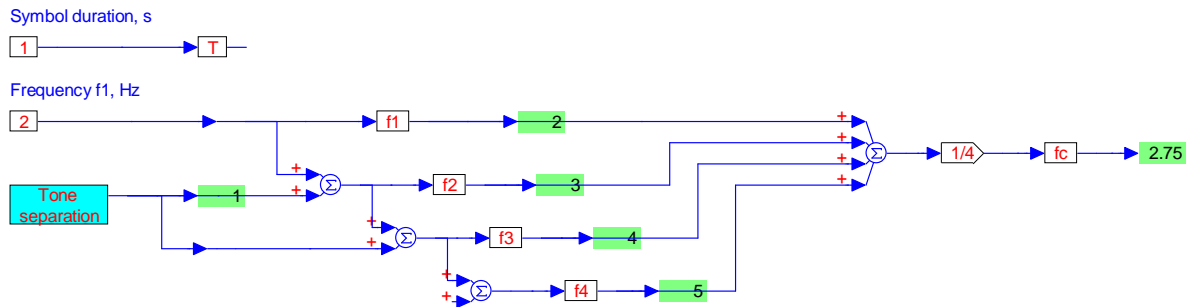


Figura 15. Suma de varios tonos igualmente espaciados

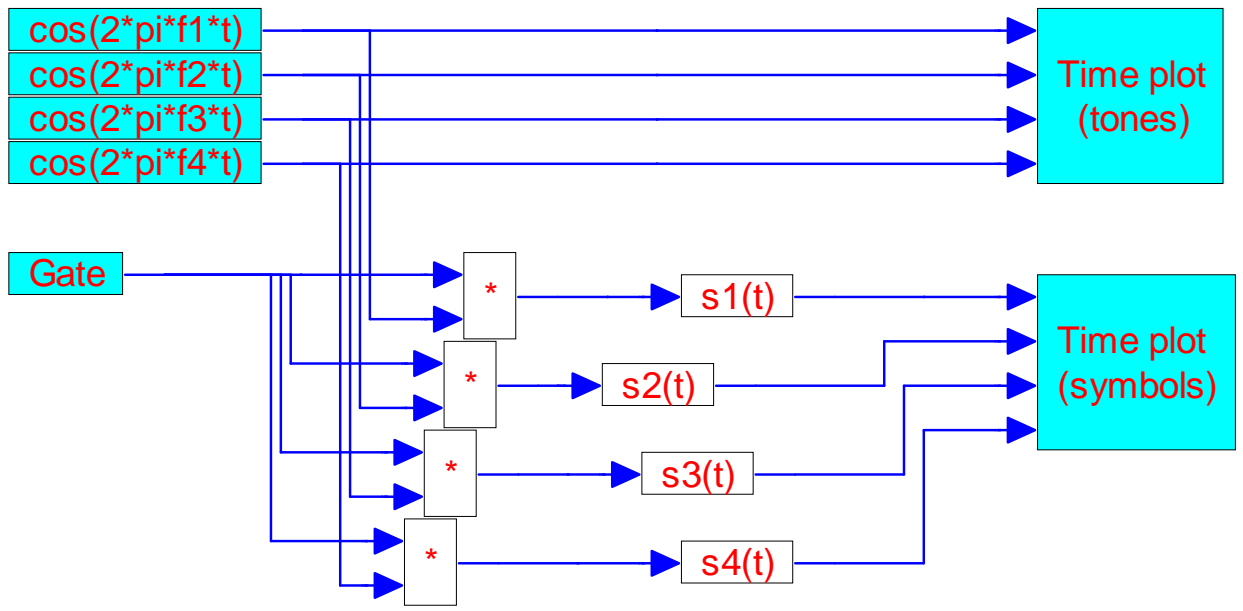


Figura 16. Constitución de los cuatro tonos

## 7.2 Procedimiento

1. Abra el archivo **FSK\_tones.vsm**
2. Determine cuál es la separación frecuencial que existe entre los tonos generados.
3. Escriba cual es la expresión matemática que representa a  $s_1(t)$ ,  $s_2(t)$ ,  $s_3(t)$  y  $s_4(t)$
4. Halle la integral de  $\int_0^T s_1(t)s_2(t)dt$  y de todas las posibles combinaciones de tonos de este sistema, establezca su valor.
5. ¿Qué pasaría si los tonos no estuvieran uniformemente espaciados?
6. Modifique el valor de las frecuencias de cada uno de los tonos de forma irregular (por ejemplo,  $f_2=1.1\text{Hz}$ ) y luego recalcule manualmente la correlación entre tonos,  $\int_0^T s_1(t)s_2(t)dt$ , compare los resultado con los de la simulación.
7. Manteniendo un espaciado fijo de frecuencia entre tonos, modifique a su gusto el resto de parámetros del sistema: Periodo del símbolo, frecuencia fundamental.  
Evalúe el valor de correlación entre **todas las posibles combinaciones de**  $s_1(t)$ ,  $s_2(t)$ ,  $s_3(t)$  y  $s_4(t)$ .

¿Qué resultado se obtuvo?

8. ¿Qué relación matemática existe entre la combinación lineal de portadoras de tonos igualmente espaciados y la transformada de Fourier.?
9. ¿Puede la FFT sustituir a un conjunto de portadoras frecuencialmente igual espaciadas? Justifique su respuesta.
10. Realice una demostración matemática de este hecho.
11. Diligencie la tabla a continuación.





## 8. LABORATORIO 4 SISTEMA OFDM SIN IFFT



Este experimento se realiza con la finalidad de mostrar como un sistema OFDM puede ser implementado utilizando un sistema de modulación y demodulación convencional, prescindiendo de técnicas como IFFT y FFT.

A pesar de que se está trabajando únicamente con 8 subportadoras (cosa que con IFFT es más fácil de manejar), la cantidad de bloques es suficiente para brindar una idea clara de cómo funciona un sistema OFDM en la realidad.

Este experimento es mucho menos complejo que el de un sistema OFDM con FFT, y tiene como finalidad ilustrar el desempeño de un sistema OFDM frente a degradaciones en el canal (Ruido Gausiano AWGN).

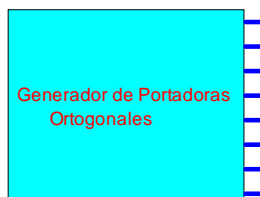
### 8.1 Procedimiento

Abra el archivo **OFDM\_sinFFT.vsm**

1. Haga doble click sobre el bloque **OFDM Tx**



2. Doble click sobre el **Generador de Portadoras Ortogonales**



3. Consigne el valor de las frecuencias de las 8 portadoras internas.
- 4.

--	--	--	--	--	--	--	--

Halle la diferencia entre dichas frecuencias. ¿Es igual? ¿Por qué? ¿Qué consecuencias trae esto?

5. ¿Qué función cumple el convertidor serie a paralelo **S/P?**, haga doble click sobre este.

Diríjase al cuadro **primer bit**,

¿Qué características tiene ese chorro de bit?

¿En qué codificación se encuentra? ¿A qué clase de modulación se va a someter?

6. Observe el analizador de espectro,  
Compare el comportamiento de cada portadora con respecto a un sistema FDM.

7. ¿Qué ventajas ofrece OFDM frente a sistemas FDM?

8. Observe la curva BER vs SNR. Confronte con los valores teóricos, ¿Existe alguna relación?

9. Diríjase al analizador de Espectro y observe la respuesta en frecuencia del sistema. ¿Corresponde la respuesta en frecuencia del sistema OFDM con los valores teóricos? Concluya.

10. ¿De qué forma se reemplaza la IFFT en este sistema?

11. ¿Por qué se dice que las portadoras son ortogonales?

Conclusiones

---

---

---

---

---

---

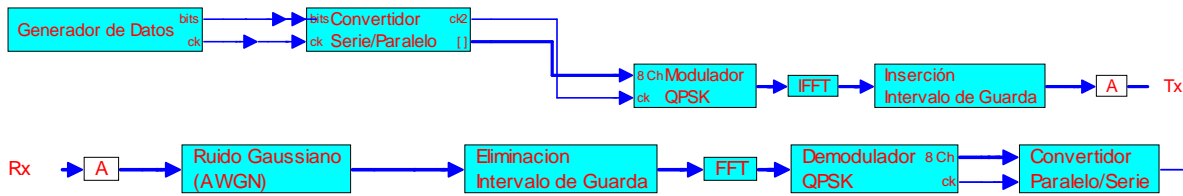
---

---

---

---

## 9. LABORATORIO 5 SISTEMA OFDM CON IFFT



### 9.1 Procedimiento

Abra el archivo **OFDM.vsm**

12. Haga doble click sobre el bloque **Convertidor Serie/Paralelo**



¿En cuánto se divide la frecuencia original de la señal?

El ancho de banda digital de entrada es \_\_\_ bps y el de la salida es \_\_\_ bps

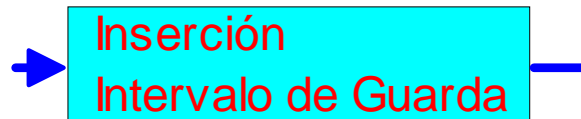
13. Doble click sobre el **Modulador QPSK**

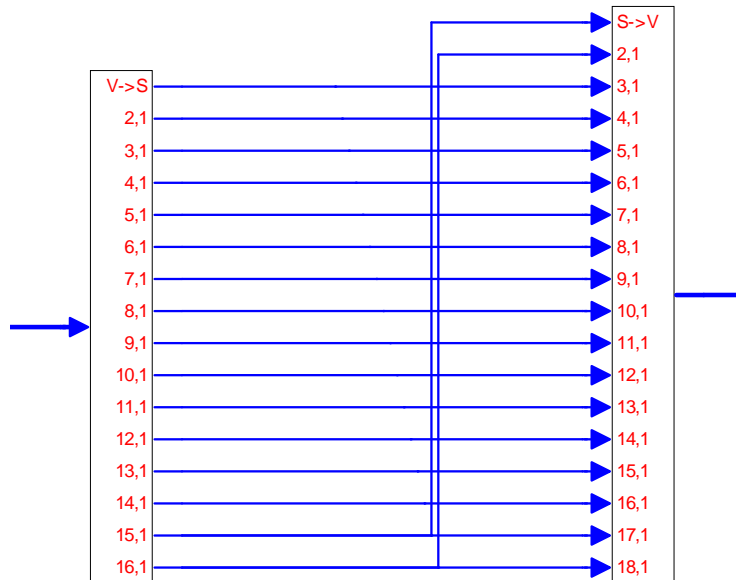


Mida la frecuencia de modulación,

$F_c =$  \_\_\_\_\_

14. Amplíe el bloque de **Inserción de intervalo de guarda**.





¿Cómo se realiza la adición del prefijo cíclico? Explique

15. ¿Qué ventajas ofrece este sistema OFDM frente a sistemas FDM y a OFDM sin inserción de intervalo de guarda?
16. Observe la curva BER vs SNR. Confronte con los valores teóricos, ¿Existe alguna relación?

## 10. SOLUCION A LABORATORIOS SELECCIONADOS

### 10.1 Laboratorio 1

- ✓ Dirijase al bloque **modulador BPSK**, y describa el comportamiento de la señal antes y después del bloque ( $f_s \cdot T_b - 1$ ).

*Solución:*

La señal binaria modifica los valores de amplitud, sin modificar la forma de onda.

Sencillamente un "0" está representado por -1V y un "1" por +1V

La salida de este bloque corresponde a una codificación No Retorno a Cero Bipolar, NRZ bipolar.

- ✓ ¿Cuál es el ancho de banda de la señal modulada BPSK?  
¿Corresponde con la fig. 2? ¿El valor del ancho de banda es el mismo?

El ancho de banda de una señal BPSK es  $2/T_b$ , y en la simulación se puede apreciar dicho valor en la gráfica del analizador de espectro

- ✓ ¿Al analizar la señal a la salida del demodulador, cual es el desfase entre símbolos? ¿Cómo se logra realizar un desfase de  $180^\circ$  entre estos? Justifique.

El desfase encontrado entre los símbolos es de  $180^\circ$ , dado que la señal empieza a adoptar valores negativos y en este caso en contrafase con el símbolo contrario.

El desfase de  $180^\circ$  se logra al multiplicar por -1 al haber un cambio de símbolo, en este caso se logra a través de la representación binaria NRZ bipolar.

- ✓ Se está trabajando con una frecuencia de portadora de 3Hz, con una velocidad de bits de 1bps. ¿Qué sucede con la señal modulada si se modifica la frecuencia de la portadora a 1.1Hz? ¿La señal modulada es continua? ¿Esto afecta el BER?

La señal modulada BPSK pierde continuidad automáticamente, y en este caso también se puede observar que el número de ciclos sinusoidales por símbolo deja de ser entero.

Como se puede ver en la gráfica BER, la señal no se ve afectada significativamente, lo que corresponde con lo que enuncia la teoría.

- ✓ Mida el BER al modificar dicho parámetro.  
No se encuentran diferencias significativas
- ✓ Observe la curva BER vs S/N. ¿La gráfica Teórica corresponde con la experimental?  
Sí, se mantienen los valores, con la misma tendencia.
- ✓ Al modificar el ángulo de fase inicial **theta**, ¿Qué sucede con la curva experimental de BER?

Los valores de BER incrementan significativamente, y difieren de los valores teóricos de BER con  $\theta=0$ .

- ✓ Cuadruple el valor de la velocidad de transmisión de bits. ¿En qué forma se ve afectada la amplitud de la señal modulada? Explique la razón por la cual esto sucede.  
Se incrementa bastante, dado que para mantener la misma potencia en la señal se requiere un incremento en la amplitud de la señal modulada.  
Esto se observa en la ecuación del marco teórico, en donde la amplitud es proporcional al inverso de la raíz cuadrada de  $T_b$
- ✓ Desactive el bloque de ruido Gausiano **AWGN Channel**. Ahora diríjase al bloque **BPSK demod**, entonces observe la entrada y la salida del bloque **integrate and dump**, explique su comportamiento.  
El bloque de *Integrate and dump*, tan solo realiza una integración durante el tiempo de un bit, si el valor final de esta es positivo, arrojará un valor de +1V, durante  $T_b$  segundos.  
Si por el contrario el valor de integración es negativo, arrojará -1V durante  $T_b$  segundos.
- ✓ ¿Por qué se realiza un retraso en toda la simulación. Contemplado en los bloques **Delay( $T_b$  sec)**? Explique con sus propias palabras.  
Como se podrá observar al mirar la forma de onda de las señales antes y después del bloque de *Integrate and dump*, se está generando un retardo en la señal demodulada de  $T_b$  segundos, es por esto, que para poder comparar la señal de entrada, con la señal de salida es preciso retardar la señal banda base.
- ✓ Compruebe la validez de la fórmula de Probabilidad de error siguiente:

$$P_e = \int_{\sqrt{E_b}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\pi N_0}} \exp\left(-\frac{x_1}{2N_0}\right) dx_1$$

$$= \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{E_b}}{\sqrt{N_0/2}\sqrt{2}}\right)$$

- ✓ Compare esta expresión con el valor de BER.

Para efectos de comparación se aconseja pasar de db a E/N en unidades naturales

Utilícese la siguiente forma

$$\frac{E}{N} = 10^{\frac{\frac{E}{N} \text{ dB}}{10}}$$

- ✓ Entre al bloque **cálculos** y mida el valor de potencia RMS consumida por el sistema. ¿Qué relación existe entre la potencia promedio y la energía de un bit  $E_b$ ?

La relación existente entre ambos no es más que el tiempo de un bit  $T_b$ .



## 10.2 Procedimiento

15. Abra el archivo **FSK\_tones.vsm**

16. Determine cuál es la separación frecuencial que existe entre los tonos generados.

R/ 2,3,4,5 Hz

17. Escriba cual es la expresión matemática que representa a  $s_1(t)$ ,  $s_2(t)$ ,  $s_3(t)$  y  $s_4(t)$

$$\cos(2\pi ft)$$

18. Halle la integral de  $\int_0^T s_1(t)s_2(t)dt$  y de todas las posibles combinaciones de tonos de este sistema, establezca su valor.  
R/ su valor es **cero**

19. ¿Qué pasaría si los tonos no estuvieran uniformemente espaciados?  
R/Las frecuencias no sería ortogonales, y en consecuencia, la integral  $\int_0^T s_1(t)s_2(t)dt$  no sería igual a cero.

20. Modifique el valor de las frecuencias de cada uno de los tonos de forma irregular (por ejemplo,  $f_2=1.1\text{Hz}$ ) y luego recalculé manualmente la correlación entre tonos,  $\int_0^T s_1(t)s_2(t)dt$ , compare los resultado con los de la simulación.  $s_2$  y  $s_3$ ,  $s_2$  y  $s_4$  no son ortogonales, dado que el resultado de la integral es:  $-6.49 \times 10^{-3}$  y  $-3.86 \times 10^{-3}$ , respectivamente.

21. Manteniendo un espaciado fijo de frecuencia entre tonos, modifique a su gusto el resto de parámetros del sistema: Periodo del símbolo, frecuencia fundamental.

Evalúe el valor de correlación entre **todas las posibles combinaciones de**  $s_1(t)$ ,  $s_2(t)$ ,  $s_3(t)$  y  $s_4(t)$ .

¿Qué resultado se obtuvo?

Todas las integrales evaluadas arrojaron como resultado **0**

22. ¿Qué relación matemática existe entre la combinación lineal de portadoras de tonos igualmente espaciados y la transformada de Fourier?  
En que la transformada de Fourier trabaja con la sumatoria de correlaciones con portadoras con frecuencias igualmente espaciadas.

23. Realice una demostración matemática de este hecho.

$$S_k = \sum_{i=0}^{N-1} s_i e^{j2\pi \frac{ki}{N}}$$

24. Diligencie la tabla a continuación.

Tabla 4. Resultado para frecuencias igualmente espaciadas

Expresión	Valor	Valor Experimental	F1	F2	¿Son ortogonales?
<b>S1(t)</b>	Cos(4pi*t)	NA	2	4	Si
<b>S2(t)</b>	Cos(8pi*t)	NA	2	4	Si
<b>S1(t)*S2(t)</b>	Cos(4pi*t)* Cos(8pi*t)	Na			
$\int_0^T s_1(t)s_2(t)dt$	Cos(4pi * t) * Cos(8pi * t)dt	0	2	4	Si

Tabla 5. Resultado para frecuencias irregularmente espaciadas

Expresión	Valor	Valor Experimental	F1	F2	¿Son ortogonales?
<b>S1(t)</b>	Cos(2.1pi*t)	NA	1.05	1.7	No
<b>S2(t)</b>	Cos(3.4pi*t)	Na	1.05	1.7	No
<b>S1(t)*S2(t)</b>	Cos(2.1pi*t)* Cos(3.4pi*t)	NA			No
$\int_0^T s_1(t)s_2(t)dt$	Cos(2.1pi * t) * Cos(3.4pi * t)dt	Na	1.05	1.7	No

# Laboratorio OFDM sin FFT

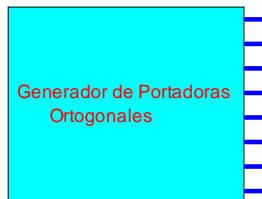
## 10.3 Procedimiento

Abra el archivo **OFDM\_sinFFT.vsm**

17. Haga doble click sobre el bloque **OFDM Tx**



18. Doble click sobre el **Generador de Portadoras Ortogonales**



19. Consigne el valor de las frecuencias de las 8 portadoras internas.

812,5	937,5	1062,5	1187,5	1312,5	1437,5	1562,5	1687,5
-------	-------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

Las frecuencias están en Hz.

Halle la diferencia entre dichas frecuencias. ¿Es igual? ¿Por qué? ¿Qué consecuencias trae esto?

Es exactamente igual y corresponde a **125Hz**, Esto se hace para que las frecuencias sean ortogonales y se mejore la eficiencia espectral.

La consecuencia más visible es que el ancho de banda de la señal disminuye.

20. ¿Qué función cumple el convertidor serie a paralelo **S/P?**, **haga doble click sobre este.**

*El convertidor Serie/Paralelo divide la frecuencia del chorro de bits.*

Diríjase al cuadro **primer bit**,

¿Qué características tiene ese chorro de bit?

*Cada chorro de bits en paralelo se caracteriza por tener un ancho de banda menor, y la frecuencia de su portadora BPSK es ortogonal con el resto de las portadoras*

¿En qué codificación se encuentra? ¿A qué clase de modulación se va a someter?

*Luego de someterse al bloque +-1, la codificación del chorro de bits es NRZ bipolar. El chorro de bits será modulado en fase, BPSK.*

21. Observe el analizador de espectro,

Compare el comportamiento de cada portadora con respecto a un sistema FDM.

*Como se puede observar se presenta mayor eficiencia espectral, dado que la misma información transmitida en un sistema FDM, consume mayor ancho de banda.*

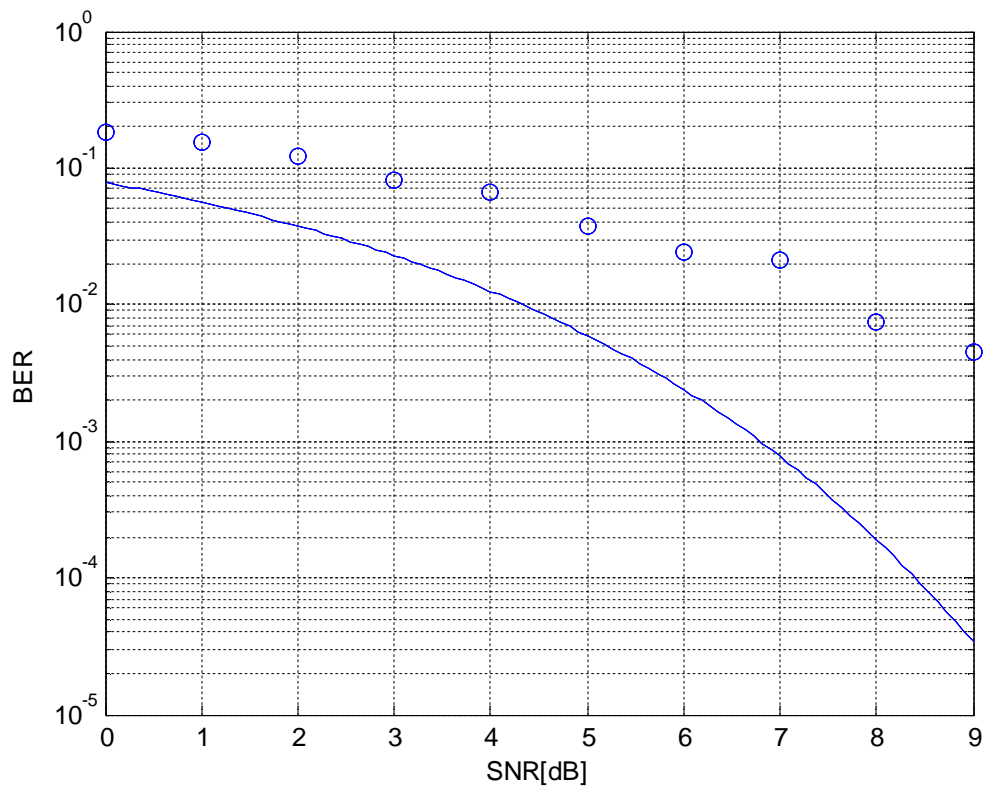
*Esto se debe básicamente a que las frecuencias son ortogonales, y se pueden traslapar en el dominio de la frecuencia, fenómeno que no es admisible en esquemas de multiplexación FDM.*

22. ¿Qué ventajas ofrece OFDM frente a sistemas FDM?

*OFDM como se puede apreciar en el analizador de espectro, presenta mayor eficiencia espectral, es decir, se transmite la misma información que en FDM en un menor ancho de banda (es decir utilizando un conjunto de frecuencias más pequeño).*

23. Observe la curva BER vs SNR. Confronte con los valores teóricos, ¿Existe alguna relación?

*Como se puede apreciar en las gráficas, se observa la misma tendencia en el comportamiento del sistema al someterse a ruido blanco gaussiano (AWGN) Véase las gráficas y compárese.*



figure(1)

```

a) snrdb=linspace(0,9);
b) snr=10.^(snrdb./10);
c) sqSnr=sqrt(snr);
d) ber=0.5*erfc(sqSnr);
e) semilogy(snrdb,ber)
f) gridon

g) teo=[0 0.180995475113122
h) 1 0.151975683890578
i) 2 0.120048019207683
j) 3 0.0823045267489712
k) 4 0.0673400673400673
l) 5 0.0380807311500381
m) 6 0.0243664717348928
n) 7 0.0215331610680448
o) 8 0.00746937556020317
    1 9 0.0045446282494092

p) l;
q) holdon
r) semilogy(teo(:,1),teo(:,2),'o');

s) xlabel('SNR[dB]');
t) ylabel('BER');

```

24. Diríjase al analizador de Espectro y observe la respuesta en frecuencia del sistema. ¿Corresponde la respuesta en frecuencia del sistema OFDM con los valores teóricos? Concluya.

25. ¿De qué forma se reemplaza la IFFT en este sistema?

*El concepto matemático de IFFT cumple las veces de un sistema de multipotadoras que están igualmente espaciados, y que está muestreado a una frecuencia de modulación específica.*

*Se invoca el uso de la IFFT por su fácil implementación en sistemas digitales.*

*Este sistema reemplaza la IFFT básicamente por un sistema BPSK cuyas portadoras están igualmente espaciadas.*

26. ¿Por qué se dice que las portadoras son ortogonales?

*Porque sus frecuencias se encuentran igualmente espaciadas o, en otras palabras, porque son múltiplos enteros de una frecuencia fundamental, en este caso es **125Hz**.*

*La consecuencia directa de las frecuencias ortogonales es que se puede ahorrar ancho de banda, y que aunque las señales se traslapen en frecuencia, no habrá fenómenos degradantes como aliasing.*

Conclusiones

**Se comprobó que en efecto el traslape entre señales en el dominio de la frecuencia no causa ninguna clase de fenómeno adverso, ahorrando ancho de banda y mejorando el desempeño del sistema frente a sistemas como FDM.**

**Se encontró que efectivamente la transformada de Fourier IFFT no es más que una forma de implementar un sistema multipotadora BPSK.**

---

---

---

---

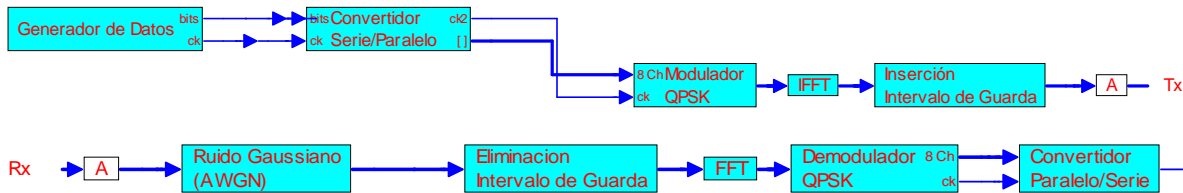
---

---

---

---

# LABORATORIO No 5 SISTEMA OFDM CON IFFT



## 10.4 Procedimiento

Abra el archivo **OFDM.vsm**

1. Haga doble click sobre el bloque **Convertidor Serie/Paralelo**

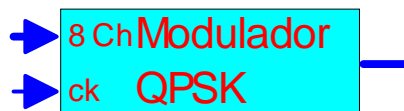


¿En cuánto se divide la frecuencia original de la señal?

En 16 bits

El ancho de banda digital de entrada es **4bp** bps y el de la salida es **0.25** bps

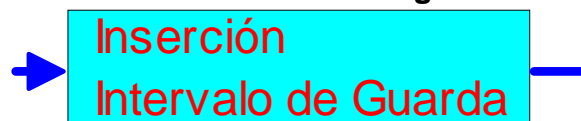
2. Doble click sobre el **Modulador QPSK**

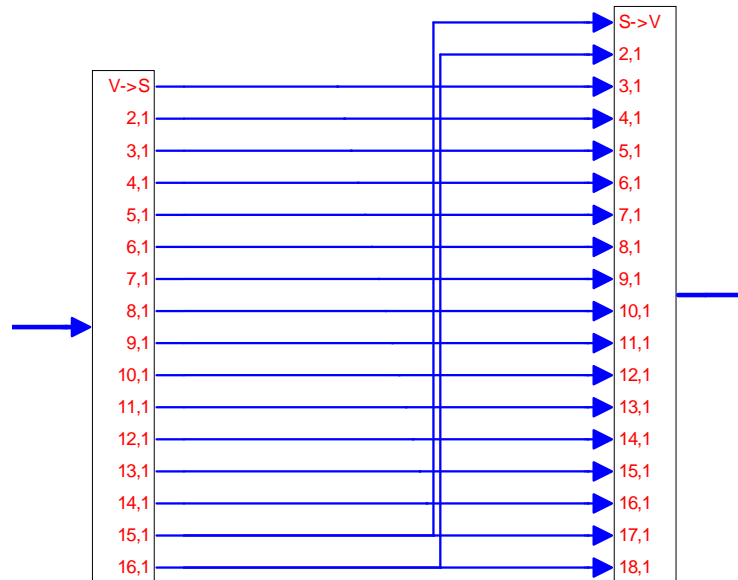


Mida la frecuencia de modulación,

$F_c=20\text{Hz}$

3. Amplíe el bloque de **Inserción de intervalo de guarda.**





¿Cómo se realiza la adición del prefijo cíclico? Explique  
Se incluye parte del símbolo original al inicio de cada símbolo transmitido.

4. ¿Qué ventajas ofrece este sistema OFDM frente a sistemas FDM y a OFDM sin inserción de intervalo de guarda?  
Que el sistema OFDM con adición de intervalo de guarda es inmune a degradación por multipath.

Esto se debe a que el símbolo ensanchado en el tiempo puede ser recuperado a través de una operación matemática llamada convolución cíclica, en donde se detecta la forma de onda del símbolo original, a partir de la combinación entre el prefijo cíclico y el símbolo original afectado por degradaciones multipath.



## 11. APLICACIONES DE UN SISTEMA OFDM

El sistema OFDM, como esquema de transmisión de datos es implementado por demandas técnicas en sistemas que requieren técnicas avanzadas de multiplexación digital en los que es indispensable ofrecer servicios de comunicaciones de gran velocidad y se necesitan redes flexibles en aspectos técnicos.

Es así como la tecnología OFDM es implementada en numerosos sistemas de comunicaciones por cable, radio móviles, celulares, WLAN, satélites móviles, entre otros.

La técnica de transmisión por medio de subcanales (y por ende subportadoras) es parte de varios estándares de comunicación, entre los cuales están:

- ✓ DVB-T (Digital Video Broadcasting-Terrestrial), Difusión digital de video terrestre, en la que se transmite la señal por medio de 2048, 4096 o 8192 subportadoras en canales de 8 MHz.
- ✓ DAB (Digital Audio Broadcasting) Difusión de video digital, en el que se implementan 1536, 768, 384 o 192 subportadoras en canales de 1536MHz
- ✓ ADSL y VDSL con 256 subportadoras.

La transmisión por OFDM es la que posiblemente sea implementada en el futuro en sistemas de broadcasting y redes de área local inalámbricas (wireless LAN).

## 12. BIBLIOGRAFÍA

BROOKS, Alan y HOELSER, Stephen J. Diseño y Simulación de un Sistema de señalización por división de Frecuencias Ortogonales (OFDM) (*Design and Simulation of Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) signaling*).

CHANG, R. W. y R.A. Gibby, Un estudio teórico del desempeño de un esquema de multiplexación de datos ortogonal ("A Theoretical Study of the Performance of an Orthogonal Multiplexing Data Transmission Scheme"), IEEE Trans. Common Vol. COM-16 N° 4, Agosto 1968, p. 527-540.

FEDCHUN, A. A. способы формирования ofdm – радиосигнала (método de formación OFDM-Radio). Rusia: Технологический институт Южного федерального университета в г. Таганроге. 2010.

GUIMARÃES, Dayan Adionel. (Comunicación personal, 18 de enero de 2011) Professor Titular - Instituto Nacional de Telecomunicações – Inatel, Santa Rita do Sapucaí, MG – Brasil.

GUIMARÃES, Dayan Adionel. Digital Transmission, A simulation Aided introduction with Vissim/Comm. (Transmisión Digital, Una introducción con simulaciones en Vissim/Comm) Brasil: Instituto Nacional de Telecomunicações (Inatel).

HARADA, Hiroshi y PRASAD, Ramjee. Simulation and Software radio for mobile communications (Simulación y Software de Radio para comunicaciones móviles). Estados Unidos: Artech house, 2002. p. 165-226.

HEATH Jr, Robert. Wireless OFDM systems (Sistemas OFDM inalámbricos) [Diapositivas]. Estados Unidos: Department of Electrical and Computer Engineering, The University of Texas. s.f. [54 diapositivas]

HSU, Hwei. Schaum's Outline of Theory and Problems of Signals and Systems (Teoría y Problemas de Señales y Sistemas). United States: McGraw Hill. 1995. p 295.

KUMAR, Bikash. Lecture 31, Fundamentals of OFDM (Fundamentos de OFDM) [video]. Bombay: Department of Electrical Engineering [video online: 56 min]. India: NPTEL courses Se encuentra en  
URL: <http://www.youtube.com/watch?v=Hajn8fAyeZ0>

MAKOTO, Itami. わかりやすい OFDM 技術 (La tecnología OFDM fácil de entender). Japon: s.n. s.f.

PARRA GUARIN, Marco A. (Comunicación personal, 22 de diciembre de 2010). Docente Especialización en Telecomunicaciones, Universidad Tecnológica de Bolívar, Cartagena-Colombia

PARRA GUARIN, Marco A. Comunicaciones por OFDM [Diapositivas]. Colombia: Universidad Tecnológica de Bolivar. 2011.

PRASAD, R. Universal Wireless Personal Communications. Norwood, MA: Artech House, 1998.

PRASAD, Ramjee. OFDM for Wireless Multimedia Communications, Norwood, MA: Artech House, 1999.

PUN, Man-On; MORELLI, Michele and KUO, C-C Jay. Multi-Carrier Techniques for Broadband Wireless Communications: A Signal Processing Perspective. Reino Unido: Imperial College Press. 2007.

VISHNEVSKY, VM; LYAKHOV, AI; SL, Portnoyi SHAKHNOVICH, IV. Широкополосные беспроводные сети передачи информации (Transmisióninalámbrica de datos en Banda ancha). Rusia.: Tecnosfera, 2005 - 592s, p.117-122.