

“GENERACIÓN DE SEÑALES OFDM”

INFORME 9

Laboratorio de Comunicaciones Digitales-GR9

1st Melanny Dávila

Ingeniería en Telecomunicaciones

Facultad de Eléctrica y Electrónica

Quito, Ecuador

melanny.davila@epn.edu.ec

2nd Ronaldo Almachi

Ingeniería en Telecomunicaciones

Facultad de Eléctrica y Electrónica

Quito, Ecuador

ronaldo.almachi@epn.edu.ec

Abstract—En el presente documento se analizará la técnica de transmisión OFDM y los diferentes bloques tanto en transmisión como en recepción que permiten efectuar la multiplexación de un conjunto de datos en subportadoras. Esta técnica de transmisión fue implementada usando el software Matlab y sus diferentes librerías con el fin de analizar la tasa bits errados (BER) para poder llegar a conclusiones más específicas acerca de su comportamiento en un canal AWGN.

Index Terms—OFDM, subportadora, prefijo cíclico, M-PSK, M-QAM.

I. INTRODUCCIÓN

La multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM) es un esquema de transmisión digital de múltiples portadoras, modulaciones y velocidades de transmisión que amplía el concepto de modulación monoportadora mediante el uso de múltiples subportadoras dentro del mismo canal [1].

En esta técnica se emiten numerosas señales subportadoras ortogonales muy espaciadas con espectros superpuestos para transmitir datos. La modulación y demodulación se basa en algoritmos de transformada rápida de Fourier ya sea directa o inversa.

En lugar de transmitir un flujo de datos de alta velocidad con una sola subportadora, OFDM hace uso de una gran cantidad de subportadoras ortogonales poco espaciadas que se transmiten en paralelo a menor velocidad, cada una de ellas se modula con un esquema de modulación digital convencional (como QPSK, 16QAM, etc.) [2].

La principal ventaja de OFDM sobre los esquemas de portadora única es su capacidad para hacer frente a condiciones severas del canal (por ejemplo, la atenuación de altas frecuencias en un cable de cobre largo, la interferencia de banda estrecha y el desvanecimiento selectivo de la frecuencia debido a múltiples trayectorias) sin filtros complejos de ecualización.

II. OBJETIVOS

- Familiarizar al estudiante con los principios de funcionamiento de OFDM.
- Utilizar Matlab para implementar un transmisor OFDM. [3].

III. PREGUNTAS

A. Analizar y presentar los resultados obtenidos tanto en el trabajo preparatorio como en la práctica, enfatizar el uso de subportadoras y el tipo de modulación. Indicar los cambios realizados en los programas.

Resultados obtenidos en el trabajo preparatorio

En la sesión de laboratorio se presentaron los resultados del trabajo preparatorio. En la figura 1 se presenta el espectro de 16 subportadoras de una señal OFDM.

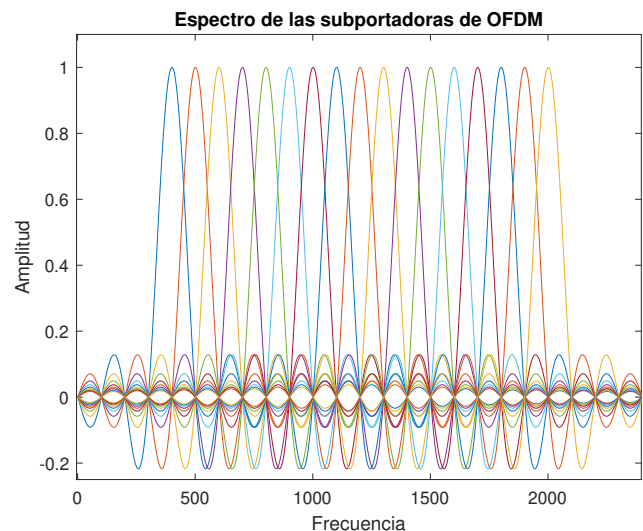


Fig. 1. Canales de frecuencia empleados en función del tiempo

El script presentado a continuación permite obtener como resultado el espectro mostrado anteriormente.

```
1 clc
2 clear all
3 close all
4
5 t=-4:0.01:20; %creacion de tiempo
6 N=16; %numero de subportadoras
7 for i=0:1:N %vector for que permite
   graficar las N subportadoras
```

```

8 y=sinc(t-i); %funcion de sampling
  (subportadora i)
9 plot(y) %grafico de cada una de la
  subportadora i
10 axis([0 length(y) -0.25 1.1] ) %
  limitacion del tamano de los ejes
11 hold on %cuadricula
12 title('Espectro de las
  subportadoras de OFDM'); %titulo
13 xlabel('Frecuencia'); %titulo del
  eje x
14 ylabel('Amplitud') %titulo del eje
  y
15 i=i+1; %incremento de la variable
  i
16 end

```

Script 1. Obtención del espectro de M portadoras

Posteriormente, se realizó la creación de una señal OFDM mediante el uso de 64 subportadoras y un prefijo cíclico de longitud 16. La técnica de modulación que se uso en este caso fue 8-PSK. Los resultados obtenidos son los siguientes:

La señal OFDM obtenida completa es mostrada en la figura 2 para efectos de estudio se utilizó límites en el eje x con el fin de analizar el prefijo cíclico, esto se presenta en la figura 3.

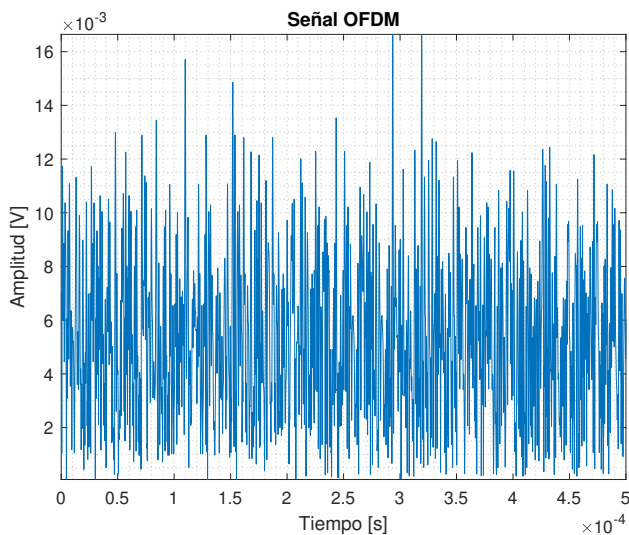


Fig. 2. Señal OFDM completa

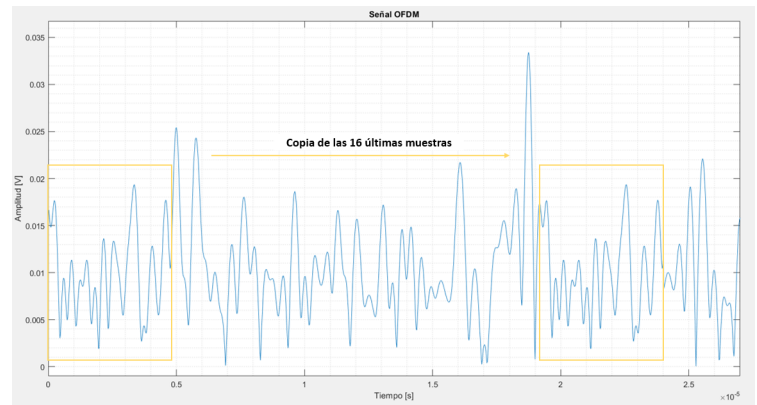


Fig. 3. Señal OFDM

El espectro en frecuencia de la señal mostrada en 2 es el siguiente:

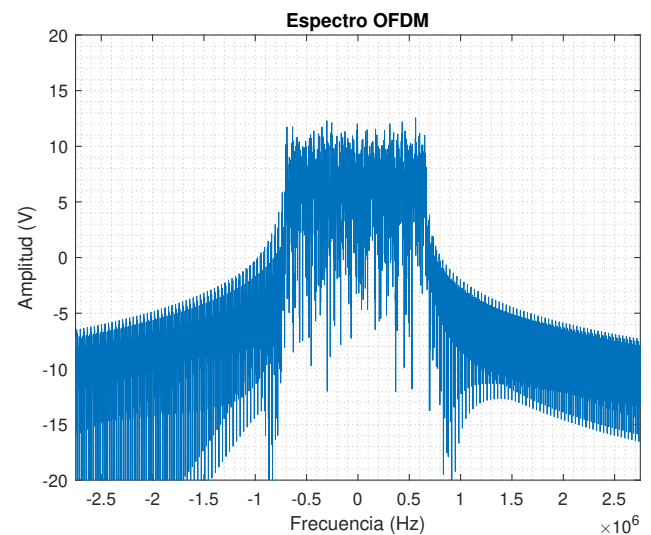


Fig. 4. Espectro de una señal OFDM

Las figuras 2, 3 y 4 fueron obtenidas en base al siguiente script:

```

1 clc
2 clear all
3 close all
4 % Inclusion de prefijo ciclico
5 CP = 1/8; % Prefijo ciclico
6 Rb = 4*10^6; % Regimen binario total
7 M = 8; % numero de fases de la
  modulación
8 fs = 40*10^6; % Frecuencia de muestreo
9
10 % Datos de la creacion de OFDM
11 Lx = 1024; % Longitud de la cadena de
  transmisión
12 Sub = 64; % Numero de subportadoras
  por simbolo (primera estimacion)

```

```

13 Nsym = ceil(Lx/Sub); % Numero de
    simbolos en la cadena
14 T = round(fs*Sub*(log2(M)/Rb)); %
    Numero de puntos de la IFFT
15 N = T; % Numero de puntos de la FFT
16 Tg = floor(T/4); % Longitud del
    prefijo ciclico
17 if CP
18     Tt = T+Tg; % Longitud total del
        simbolo cuando hay prefijo ciclico
19 else
20     Tt = T; % Longitud total del
        simbolo cuando NO hay prefijo
        ciclico
21 end
22 % Reajustamos algunos datos
23 if N <= 3*Sub
24     nc = floor(log2(N/3)); %
        Reajustamos nc para que N > 3*Nc, y
        Nc sea potencia de 2
25     Sub = 2^(nc); % Reajustamos Nc a
        partir de nc
26 clear nc
27 end
28 Lx = Nsym*Sub; % Reajustamos la
    longitud de la cadena de
    transmision
29 X = zeros(1,Lx); % Cadena de simbolos
30 x = zeros(T,Nsym); % IFFT de cada
    simbolo agrupadas en columnas
31 Tx = zeros(1,Nsym*Tt); % Senal
    transmitida
32 X = sign(randn(1,Lx)) + 1i*sign(randn
    (1,Lx)); % Cadena aleatoria de
    datos M-PSK
33 % Creacion de la senal OFDM
34 X = reshape(X,Sub,Nsym); % Bloque S/P:
    Separamos la cadena en simbolos
    OFDM
35 x = ifft(X,T); % Bloque IFFT: Hacemos
    la IFFT de cada simbolo
36 if CP % Bloque PC: Anadimos el prefijo
    ciclico si procede
37     xg(1:Tg,:) = x(T-Tg+1:T,:);
38     xg(Tg+1:Tt,:) = x;
39     x = xg;
40     clear xg;
41 end
42 Tx = reshape(x,1,Nsym*Tt); % Bloque P/
    S: Senal transmitida en cadena
43 if Nsym > 16 % En caso de que la
    cadena sea muy larga
44     Tx = Tx(1:16*Tt); %
        Seleccionamos una parte
        significativa de la cadena
45     Nsym = 16;
46 end
47 % Grafica en el tiempo
48 figure(1)
49 tm = log2(M)*(1/Rb); % Tiempo de
    simbolo PSK
50 tmax = Nsym*Sub*tm; % Intervalo de
    tiempo representado
51 t = tmax/length(Tx) : tmax/length(
    Tx) : tmax;
52 plot(t,abs(Tx))
53 axis([0 3.8e-4 min(abs(Tx)) max(
    abs(Tx))]); %Eje completo
54 %axis([0 2.7e-5 -1e-3 1.1*max(abs(
    Tx))]) %Eje limitado
55 title('Senal OFDM')
56 xlabel('Tiempo [s]')
57 ylabel('Amplitud [V]')
58 grid minor
59 % Grafica en la frecuencia
60 figure(2)
61 TX = fft(Tx,(N/Sub)*length(Tx)); %
    Hallamos el espectro
62 TX = fftshift(TX); % Colocamos la
    componente 0 en el centro del
    espectro
63 x1 = floor((1/2-3*Sub/(2*N))*
    length(TX));
64 x2 = floor((1/2+(5*Sub)/(2*N))*
    length(TX));
65 TX = TX(x1:x2); % Seleccionamos la
    parte que queremos representar
66 i = find(abs(TX)<0.01);
67 TX(i) = 0.01; % Limitamos el
    minimo para pasar a dB
68 TX = 10*log10(abs(TX)); % Pasamos
    el espectro a dB
69
70 ABsub = (2/log2(M))*Rb/Sub; %
    Ancho de banda de cada subportadora
71 ABmax = (1+Sub)*ABsub/2; % Ancho
    de banda total de OFDM
72 f = -2*ABmax : 4*ABmax/(length(TX)
    -1) : 2*ABmax;
73 plot(f,TX)
74 axis([-2*ABmax 2*ABmax -20 20])
75 title('Espectro OFDM')
76 xlabel('Frecuencia (Hz)')
77 ylabel('Amplitud [V]')
78 grid minor

```

Script 2. Obtención de un señal OFDM con 64 subportadoras

Resultados obtenidos en la sesión de laboratorio

Como primera parte de la práctica de laboratorio, se presentó los resultados mostrados anteriormente; los mismo que fueron realizados como parte del trabajo preparatorio. Posterior a eso se cambió los parámetros de trabajo para OFDM, los resultados que se muestran a continuación tienen las siguientes características:

- Esquema de modulación: 32-QAM
- Número de subportadoras ortogonales: 32
- Tamaño del prefijo cíclico: 8

De igual manera, se presenta la señal OFDM completa y un segmento de dicha señal donde se hace énfasis en las 8 muestras finales de un símbolo OFDM que se copian al inicio del mismo símbolo, tal como se muestra en la figura 6.

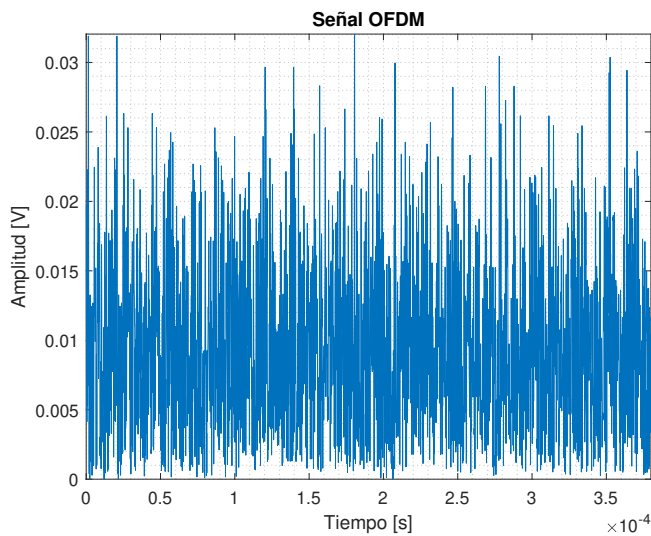


Fig. 5. Señal OFDM completa

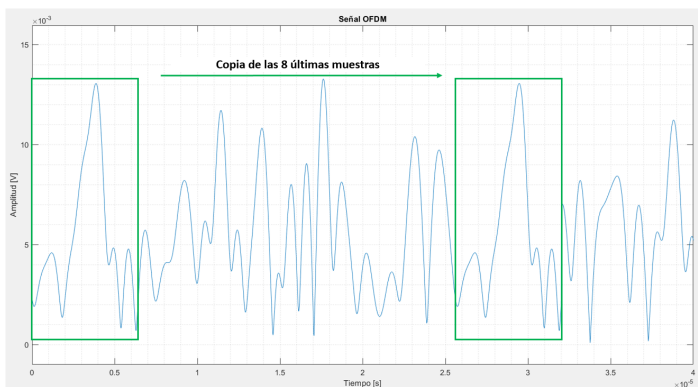


Fig. 6. Señal OFDM

Como se presenta en 7, el espectro obtenido es más denso en este caso debido a la cantidad de datos y subportadoras que se utiliza en esta técnica de transmisión.

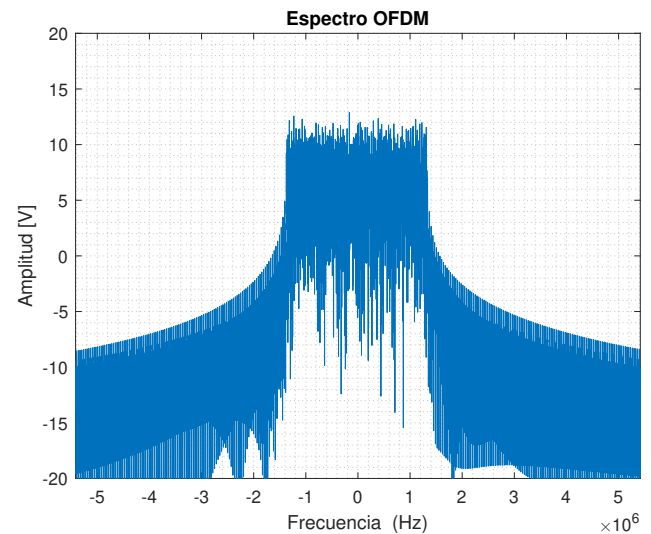


Fig. 7. Espectro de una señal OFDM

Estos resultados fueron obtenidos en base al siguiente script.

```

1 clc
2 clear all
3 close all
4 % Inclusion de prefijo ciclico
5 CP = 1/16; % Prefijo ciclico
6 Rb = 8*10^6; % Regimen binario total
7 M = 32; % numero de fases de la
  modulación
8 fs = 40*10^6; % Frecuencia de muestreo
9
10 % Datos de la creacion de OFDM
11 Lx = 1024; % Longitud de la cadena de
  transmisión
12 Sub = 32; % Numero de subportadoras
  por simbolo (primera estimacion)
13 Nsym = ceil(Lx/Sub); % Numero de
  simbolos en la cadena
14 T = round(fs*Sub*(log2(M)/Rb)); %
  Numero de puntos de la IFFT
15 N = T; % Numero de puntos de la FFT
16 Tg = floor(T/4); % Longitud del
  prefijo ciclico
17 if CP
18     Tt = T+Tg; % Longitud total del
  simbolo cuando hay prefijo ciclico
19 else
20     Tt = T; % Longitud total del
  simbolo cuando NO hay prefijo
  ciclico
21 end
22 % Reajustamos algunos datos
23 if N <= 3*Sub
24     nc = floor(log2(N/3)); %
  Reajustamos nc para que N > 3*Nc, y

```

```

25     Nc sea potencia de 2
    Sub = 2^(nc); % Reajustamos Nc a
    partir de nc
26 clear nc
27 end
28 Lx = Nsym*Sub; % Reajustamos la
    longitud de la cadena de
    transmision
29 X = zeros(1,Lx); % Cadena de simbolos
30 x = zeros(T,Nsym); % IFFT de cada
    simbolo agrupadas en columnas
31 Tx = zeros(1,Nsym*Tt); % Senal
    transmitida
32 X = sign(randn(1,Lx)) + 1i*sign(randn
    (1,Lx)); % Cadena aleatoria de
    datos M-PSK
33 % Creacion de la senal OFDM
34 X = reshape(X,Sub,Nsym); % Bloque S/P:
    Separamos la cadena en simbolos
    OFDM
35 x = ifft(X,T); % Bloque IFFT: Hacemos
    la IFFT de cada simbolo
36 if CP % Bloque PC: Anadimos el prefijo
    ciclico si procede
37     xg(1:Tg,:) = x(T-Tg+1:T,:);
38     xg(Tg+1:Tt,:) = x;
39     x = xg;
40     clear xg;
41 end
42 Tx = reshape(x,1,Nsym*Tt); % Bloque P/
    S: Senal transmitida en cadena
43 if Nsym > 16 % En caso de que la
    cadena sea muy larga
44     Tx = Tx(1:16*Tt); %
    Seleccionamos una parte
    significativa de la cadena
45     Nsym = 16;
46 end
47 % Grafica en el tiempo
48 figure(1)
49 tm = log2(M)*(1/Rb); % Tiempo de
    simbolo PSK
50 tmax = Nsym*Sub*tm; % Intervalo de
    tiempo representado
51 t = tmax/length(Tx) : tmax/length(
    Tx) : tmax;
52 plot(t,abs(Tx))
53 axis([0 3.8e-4 min(abs(Tx)) max(
    abs(Tx))]); %Eje completo
54 %axis([0 2.7e-5 -1e-3 1.1*max(abs(
    Tx))]) %Eje limitado
55 title('Senal OFDM')
56 xlabel('Tiempo [s]')
57 ylabel('Amplitud [V]')
58 grid minor
59 % Grafica en la frecuencia

```

```

60 figure(2)
61 TX = fft(Tx,(N/Sub)*length(Tx)); %
    Hallamos el espectro
62 TX = fftshift(TX); % Colocamos la
    componente 0 en el centro del
    espectro
63 x1 = floor((1/2-3*Sub/(2*N))*
    length(TX));
64 x2 = floor((1/2+(5*Sub)/(2*N))*
    length(TX));
65 TX = TX(x1:x2); % Seleccionamos la
    parte que queremos representar
66 i = find(abs(TX)<0.01);
67 TX(i) = 0.01; % Limitamos el
    minimo para pasar a dB
68 TX = 10*log10(abs(TX)); % Pasamos
    el espectro a dB
69
70 ABsub = (2/log2(M))*Rb/Sub; %
    Ancho de banda de cada subportadora
71 ABmax = (1+Sub)*ABsub/2; % Ancho
    de banda total de OFDM
72 f = -2*ABmax : 4*ABmax/(length(TX)
    -1) : 2*ABmax;
73 plot(f,TX)
74 axis([-2*ABmax 2*ABmax -20 20])
75 title('Espectro OFDM')
76 xlabel('Frecuencia (Hz)')
77 ylabel('Amplitud [V]')
78 grid minor

```

Script 3. Obtención de un señal OFDM con 32 subportadoras

Como punto final del desarrollo práctico, en base al Script 3, se realizó el cálculo de la tasa de bit errados (BER). Para ello se completo dicho código implementando el proceso de demodulación y recepción. Todo esto con el fin de obtener de los datos recuperados en el receptor y de esta manera poder realizar una comparación directa con respecto a los datos originales.

Como una forma de visualizar los errores producidos durante la transmisión, se ha optado por graficar los datos discretos, es decir muestreados en un intervalo de tiempo.

En la figura 8, se puede observar una señal de datos aleatoria antes de comenzar con el proceso de transmisión, con técnicas OFDM, para visualizar de mejor manera la señal original y la señal recibida se uso un número de de datos de 64 bits, esto produce que la señal OFDM no tenga una forma parecida a una sinusoidal, mientras que la ultima gráfica muestra la señal recibida con varios errores, estos errores son mas notorios ya que se los visualiza antes de que lleguen a un dispositivo de decisión; el mismo que los delimitará en un rango entre 1 y 0.

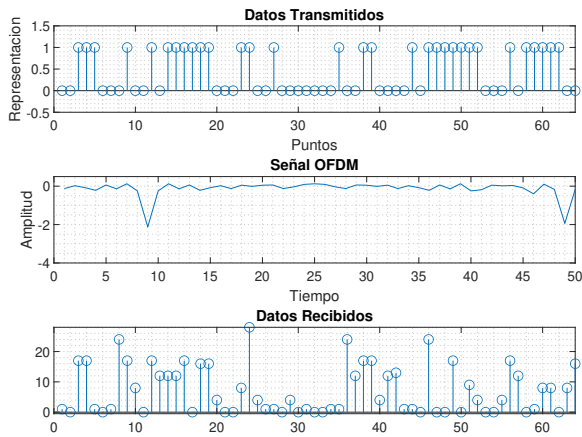


Fig. 8. Señal OFDM a través de un canal de SNR de 5dB

En la figura 9, se puede apreciar el resultado de la probabilidad de bit de errado, para una señal con las características que se mencionaron en el punto anterior, pero con un número de datos de 64 bits.

En este caso se tiene un valor de BER de casi 20%, es decir un resultado poco eficiente, si se utiliza un mayor número de datos el resultado sería una transmisión poco eficiente con múltiples errores.

Probabilidad de bit errado (BER): 0.19271

Fig. 9. Resultado del cálculo del BER

Como se ilustra en la figura 10, en caso de tener un SNR de 20dB, el resultado es muy diferente a simple vista, en donde únicamente existe un bit errado, con un margen de error que tiende al 0%, como se ve en la figura 11.

Es decir, si se tiene un valor un poco alto de relación señal a ruido en sistemas OFDM, el proceso de transmisión de datos es casi ideal, teniendo uno de los mejores rendimientos con respecto a otras técnicas de transmisión de datos.

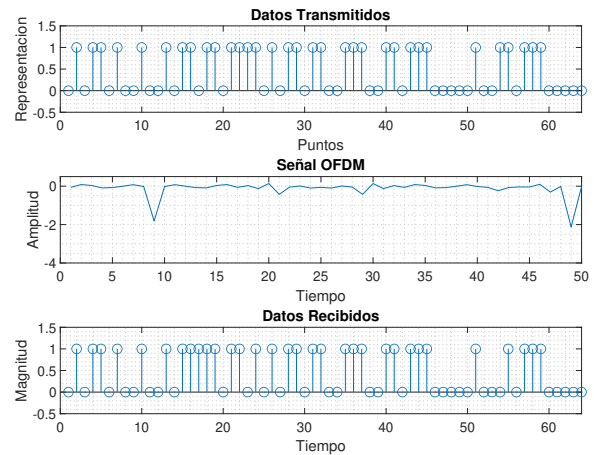


Fig. 10. Señal OFDM a través de un canal de SNR de 20dB

Probabilidad de bit errado (BER): 0.0078125

Fig. 11. Resultado del cálculo del BER

Todos los resultados obtenidos en este apartado, se consiguieron en base al script 4.

```
1 clear all
2 clc
3 close
4
5 M = 32;%nivel de modulacion
6 SNR = 20;%Relacion senal a ruido
7 no_of_data_points = 64; %numero de
  datos mutiplo de 8
8 block_size = 32;% numero de
  subportadoras
9 cp_len = block_size/4; %numero de CP
10
11 data_source = randsrc(1,
    no_of_data_points, 0:1);
12 data_ingreso=de2bi(data_source,6);
13 subplot(3,1,1)
14 stem(data_source);axis([0 length(
    data_source) -0.5 1.5]); grid minor
    ; xlabel('Puntos'); ylabel('
    Representacion')
15 title('Datos Transmitidos')
16 % MODULACION 32QAM
17 gam_modulated_data = gammod(
    data_source, M);
18 %REDIMENSIONADO EL VECTOR DE SERIE A
  PARALELO
19 num_cols=length(gam_modulated_data)/
  block_size;
```

```

20 data_matrix = reshape(
    gam_modulated_data, block_size,
    num_cols);
21 %DIEMNSION DE LA MATRIZ PARA EL
    PREFIJO CICLICO
22 cp_start = block_size-cp_len;
23 cp_end = block_size;
24 %USAMOS LA TRANSFORMADA RAPIDA INVERSA
    DE FOURIER
25 for i=1:num_cols,
26     ifft_data_matrix(:,i) = ifft((
        data_matrix(:,i)),block_size);
27     %OBTENCION DEL PREFIJO CICLICO
28     for j=1:cp_len,
29         actual_cp(j,i) =
            ifft_data_matrix(j+cp_start,i);
30         %ADICION DEL CP
31     end
32
33     ifft_data(:,i) = vertcat(actual_cp
        (:,i),ifft_data_matrix(:,i));
34 end
35 % CONVERTIMOS DE PARALELO A SERIE
36 [rows_ifft_data cols_ifft_data]=size(
    ifft_data);
37 len_ofdm_data = rows_ifft_data*
    cols_ifft_data;
38 %REDIMENSIONAMOS NUEVAMENTE LA MATRIZ
    A VECTOR
39 ofdm_signal = reshape(ifft_data, 1,
    len_ofdm_data);
40 subplot(3,1,2)
41 %GRAFICAMOS EN TIEMPO DISCRETO
42 plot(real(ofdm_signal));axis([0 50 -4
    0.5]); xlabel('Tiempo'); ylabel('
    Amplitud');
43 title('Senal OFDM');grid minor;
44
45 %PASAMOS A TRAVES DE UN CANAL CON
    RUIDO
46 ofdm_signal1=awgn(ofdm_signal,SNR);
47
48 %ETAPA DE RECEPCION
49 recvd_signal = ofdm_signal1;
50 %CONVERTIMOS DE PARALELO A SERIE
51 recvd_signal_matrix = reshape(
    recvd_signal,rows_ifft_data,
    cols_ifft_data);
52 %ELIMINAMOS EL PREFIJO CICLICO
53 recvd_signal_matrix(1:cp_len,:)=[];
54 %OBTENEMOS LA TRANSFORMADA RAPIDA DE
    FOURIER
55 for i=1:cols_ifft_data,
56
57     fft_data_matrix(:,i) = fft(
        recvd_signal_matrix(:,i),block_size

```

```

    );
58 end
59 %CAMBIAMOS DIMENSIONES DE LOS DE LA
    MATRIZ
60 recvd_serial_data = reshape(
    fft_data_matrix, 1,(block_size*
    num_cols));
61 %DEMODULAMOS USANDO 32QAM
62 gam_demodulated_data = gamdemod(
    recvd_serial_data,M);
63 subplot(3,1,3)
64 %GRAFICAMOS NUESTRA DEMODULACION
65 stem(gam_demodulated_data);axis([0
    length(gam_demodulated_data) -0.5
    1.5]);grid minor;
66 xlabel('Tiempo');
67 ylabel('Magnitud');
68 title('Datos Recibidos');
69 %CONVERTIMOS NUESTROS DATOS
    DEMODULADOS
70 data_salida=de2bi(gam_demodulated_data
    ,6);
71
72 %RESPECTIVO CALCULO DE ERRORES BER
73 [x,BER]=biterr(data_ingreso,
    data_salida);
74 BER
75
76 disp(['Probabilidad de bit errado (BER
    ): ',num2str(BER)])

```

Script 4. Señales OFDM con su respectivo cálculo de BER

B. Establecer una comparación de los sistemas OFDM en tiempo Continuo y tiempo Discreto.

- Modelo del sistema en tiempo continuo: El sistema OFDM continuo en el tiempo que se representa en la figura 12 puede considerarse como el sistema OFDM ideal. Los primeros sistemas OFDM no empleaban

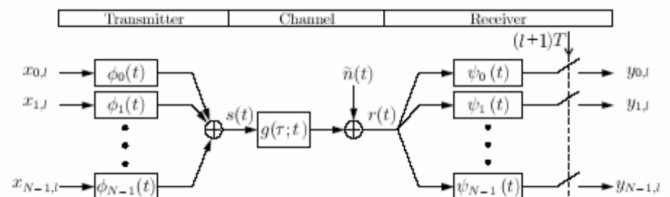


Fig. 12. Sistema OFDM tiempo continuo

modulación ni demodulación digital. Por ello, el modelo de tiempo continuo para OFDM, en la práctica es sintetizado digitalmente. Tuvo poca aceptación por la dificultad que suponía disponer tanto en el transmisor como en el receptor bancos de osciladores perfectamente sintonizados y sincronizados. Se puede considerar como

la idea sobre la que se construyó el sistema OFDM digital que actualmente se emplea [4].

A continuación se describirán los principales elementos de este sistema:

- Transmisor: Asumiendo un sistema OFDM con N subportadoras, un ancho de banda de W[Hz] y símbolos de longitud T segundos, de los cuales T_{cp} segundos es la longitud del prefijo cíclico, los transmisores usan las siguientes formas de ondas:

$$\phi_k(t) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{T-T_{CP}}} e^{j2\pi \frac{W}{N} k(t-T_{cp})} & \text{si } t \in [0, T], \\ 0 & \text{en otros casos} \end{cases} \quad (1)$$

Donde $T = \frac{N}{W} + T_{cp}$, así $\phi_k(t) = \phi_k(t + \frac{N}{W})$ es un pulso rectangular modulado en la frecuencia portadora $k \frac{W}{N}$ [5]. Por lo tanto se tiene que la forma de onda de $\phi_k(t)$ usada en la modulación y la señal de banda base transmitida para un símbolo OFDM es:

$$s_l(t) = \sum_{k=0}^{N-1} x_{k,l} \phi_k(t - lT) \quad (2)$$

Donde $x_0, 1, x_{1,1}, \dots, x_{N-1,1}$ son números complejos de un conjunto de puntos de señal de una constelación. n. Cuando una secuencia infinita de símbolos OFDM son transmitidos, la salida del transmisor es yuxtapuesta de los símbolos OFDM individuales:

$$s(t) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} s_l(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{k=0}^{N-1} x_{k,i} \phi_k(t - iT) \quad (3)$$

- Canal: Si se asume que el soporte de la respuesta impulsiva $g(\tau; t)$ del canal físico está restringida al intervalo $\tau \in [0, T_{cp}]$ para la longitud del prefijo cíclico. La señal recibida llega a ser la siguiente:

$$r(t) = (g * s)(t) = \int_0^{T_{cp}} g(\tau; t) s(t - \tau) d\tau + n(t) \quad (4)$$

Donde el ruido $n(t)$ es aditivo, blanco y Gaussiano.

- Receptor: El receptor OFDM consiste en un banco de filtro, emparejado en la última parte $[T_{cp}, T]$ de la onda transmitida $\phi_k(t)$, es decir [5]:

$$\psi_k(t) = \begin{cases} \phi_k^*(T - t) & \text{si } t \in [0, T - T_{cp}], \\ 0 & \text{en otros casos} \end{cases} \quad (5)$$

Lo que significa que el prefijo cíclico es removido en el receptor. Como el prefijo cíclico contiene todo el ISI de los símbolos previos, la salida del banco de filtro del receptor no contiene ISI. Así se puede

ignorar el índice temporal l al momento de calcular la salida en los k-th filtros [6]. Pudiendo obtener:

$$y_k = (r * \psi_k)(t)|_{t=T} = \int_{-\infty}^{\infty} r(t) \psi_k(T - t) dt \quad (6)$$

Si el canal está fijado sobre los intervalos de símbolos OFDM y se denota por $g(\tau)$, se tiene de (6) como resultado:

$$y_k = \sum_{k'=0}^{N-1} x_{k'} \int_{T_{cp}}^T \left(\int_0^{T_{cp}} g(\tau) \phi_{k'}(t - \tau) d\tau \right) \phi_k^*(t) dt + \int_{T_{cp}}^T n(T - t) \phi_k^*(t) dt \quad (7)$$

Tal como se muestra, este sistema presenta una gran complejidad debido a que se debe trabajar con gran cantidad de información la misma que debe tener una perfecta sincronización entre el transmisor y el receptor [7]. Para finalmente aplicar la transformada de Fourier a $g(\tau)$ con el fin de simplificar un poco el banco de filtro en recepción [5].

- Modelo del sistema en tiempo discreto: Se muestra un modelo completo en tiempo discreto OFDM en la figura . Comparado con el modelo de tiempo continuo, la modulación y la demodulación son remplazadas por una transformada de Fourier directa (DFT) y otra inversa (IDFT), respectivamente, y el canal es una convolución discreta en el tiempo [8]. El prefijo cíclico opera de la misma manera en el sistema y los cálculos se realizan siguiendo los mismos pasos. La principal diferencia es que todas las integrales se sustituyen por acumuladores [5].

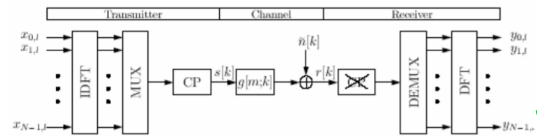


Fig. 13. Sistema OFDM tiempo discreto

Desde el punto de vista de los receptores, el uso de un prefijo cíclico más largo que el canal transformará la convolución lineal en el canal en una convolución cíclica [5]. Se puede describir el sistema OFDM como:

$$y_l = DFT(IDFT(x_l) \otimes g_l + n_l) \quad (8)$$

$$= DFT(IDFT(x_l) \otimes g_l) + n_l \quad (9)$$

donde y_l contiene los N datos recibidos, x_l la constelación de N puntos transmitidos, g representa la respuesta impulsiva del canal (relleno con ceros para obtener una longitud N), y n_l es el ruido del canal [4]. Si el ruido del canal se asume blanco y Gaussiano, el término $n_l = DFT(n_l)$ representa ruido incorrelado

Gaussiano. Al usar la DFT de dos señales convolucionadas cíclicamente es equivalente a el producto de sus DFTs individuales [5]. En base a eso se puede escribir:

$$y_l = x_l \cdot DFT(g_l) + n_l = x_l \cdot h_l + n_l \quad (10)$$

Donde $h_l = DFT(g_l)$ es la respuesta en frecuencia del canal. Así se obtiene el mismo tipo de canales paralelos Gaussianos que se obtuvo para el modelo de tiempo continuo. La única diferencia es que la atenuación del canal h_l está dada por los N puntos de la DFT del canal discreto en tiempo, en lugar del muestreo de la respuesta en frecuencia [8].

C. Describir la importancia de la Transformada Discreta de Fourier (DFT), la IFFT y la FFT en los sistemas OFDM.

OFDM en tiempo discreto: Consiste en dividir una secuencia de datos de entrada en N secuencias de k datos con velocidades más baja respecto a la original, en donde cada una de estas es modulada con una subportadora diferente.

Este sistema tiene una serie de etapas por las cuales debe atravesar la secuencia de datos, y una de las más importantes es el bloque donde se realiza la transformada inversa rápida de Fourier y la transformada rápida de Fourier, ambas son necesarias pues el resultado de estas servirá para modular y demodular la señal en el dominio de frecuencia y tiempo respectivamente, esto se puede apreciar en la figura 14. [9]

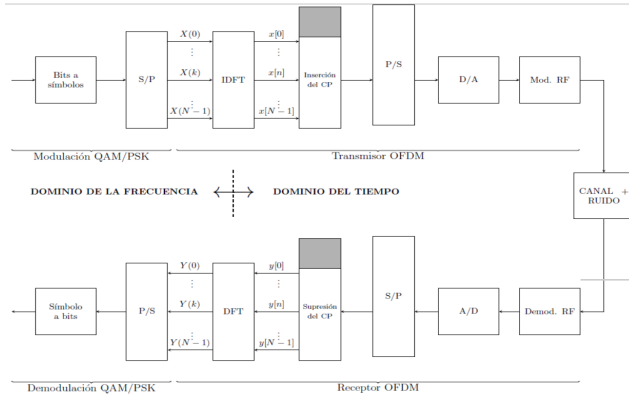


Fig. 14. Diagrama de bloques de OFDM [9]

Tal y como se ve en la figura 14, la IFFT o IDFT es la encargada de convertir las señales de entrada con N subportadoras moduladas en el dominio de la frecuencia en N muestras de tiempo discretas complejas, además de cumplir otras funciones que son igual de importantes para OFDM, como son [9]:

- IDFT actúa como multiplexor, donde los símbolos transportados por N subportadoras se transmiten como una señal única discreta con N muestras por duración de símbolo. [9]
- Se encarga de que las subportadoras se vuelvan ortogonales entre si, separadas por $\Delta f = \frac{1}{T}$ [9].

Forma de operación:

En la figura 15, se presenta el esquema de como las diferentes subportadoras en el dominio de la frecuencia pasan a través de la IDFT, y se convierten en muestras complejas en el dominio del tiempo.

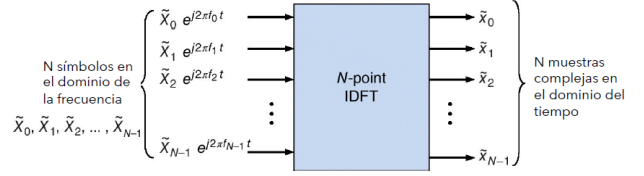


Fig. 15. Forma de operar de IDFT [9]

Una señal pasabanda $x(t)$, con un ancho de banda B, puede ser expresada en función de su señal envolvente compleja $\tilde{x}(t)$ como:

$$x(t) = \text{Re}[\tilde{x}(t)e^{j\omega_c t}] \quad (11)$$

Donde $\tilde{x}(t)$ está definida por la transformada inversa de Fourier:

$$\tilde{x}(t) = \frac{1}{B} \int_0^B \tilde{X}(f) e^{j2\pi f t} df \quad (12)$$

Sobre el ancho de banda OFDM, $B = N\Delta f$

Se tiene que $\tilde{x}(t)$ puede ser expresada como la IDFT de las subportadoras moduladas.

$$\tilde{x}(t) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \tilde{X}_n e^{j2\pi f_n t}, \quad 0 < t < T \quad (13)$$

$$f_n = f_0 + \Delta f_n, \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (14)$$

Donde $\tilde{X}_n = \tilde{X}(f_n)$ y $\Delta f = \frac{1}{T}$.

Su representación discreta en tiempo con $\tilde{x}_k = \tilde{x}(t_k)$ produce:

$$\tilde{x}_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \tilde{X}_n e^{j2\pi \frac{k n}{N}}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (15)$$

Donde: $t_k = \frac{k}{N} T$

La transformada inversa correspondiente es:

$$\tilde{X}_n = \sum_{k=0}^{N-1} \tilde{x}_k e^{-j2\pi \frac{k n}{N}}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (16)$$

En base al desarrollo teórico presentado se puede obtener el resultado de figura 1, en donde dicha señal cumple lo ya establecido durante este proceso.

Finalmente la DFT o FFT, cumple la función de convertir lo obtenido en tiempo después de pasar a través de un canal con ruido y ser demodulada, al dominio de la frecuencia, realizando el proceso inverso de lo ya planteado. [9]

Es por eso que la IDFT y la DFT tienen tanta importancia en OFDM.

IV. CONCLUSIONES

- Ronaldo Almachi:

- 1) El bloque de IDFT y de DFT, es uno de los más importantes en un sistema OFDM, pues como se

observo a lo largo de la practica es el encargado de pasar las subportadoras en el dominio de la frecuencia a un conjunto de muestras complejas en el dominio del tiempo, esto contribuye para que la señal sea mas fácil de tratar, al tener una manera relativamente fácil de añadir un CP y de realizar modulación, y de de la misma manera el proceso inverso para recuperar la señal original.

- 2) Con un número reducido de muestras menor o igual a los 256 bits, las señales OFDM junto con las técnicas de modulación usadas y la SNR del canal, tienden a ser señales más parecidas a una señal triangular que a una sinusoidal, esto provoca que el prefijo cíclico añadido tenga una forma un poco diferente a la de los últimos bits se la señal, esto se puede fácilmente solucionar al usar un numero de puntos al menos 5 veces superior al número de subportadoras, pues estp contribuye a evitar errores de ISI e ICI.
- 3) La técnica de transmisión OFDM, es muy eficiente ya que en conjunto con una SNR alta, nos dan como resultado un BER bastante bajo en donde existe 1 bit errado de un grupo de 64 bits totales enviados, para un mayor flujo de información se aprovecha de mejor manera esta característica pues en esos casos, la velocidad de cada suportadora al ser menor N que la original permite al sistema ser más robusto ante errores por sincronización en tiempo.

- Melanny Dávila:

- 1) El uso del prefijo ciclico presenta un beneficio doble debido a que evita la creación de ISI (actuando como espacio de guarda) y de ICI (manteniendo la ortogonalidad de las subportadoras).Sin embargo, en el caso de no existir un sincronismo perfecto (muestreo en el tiempo correcto de los datos en los puntos donde todas las subportadoras son nulas y solo una tiene un valor), la información no sería reconocida en el receptor, porque llegarían todos las datos mezclados.
- 2) La implementación de OFDM permite un uso eficiente del espectro de frecuencias debido al solapamiento que existe entre las subportadoras, logrando así dividir al canal de transmisión en N subcanales de banda estrecha.
- 3) El sincronizmo entre el transmisor y el receptor es importante sobretudo en frecuencia debido a que si no ocurre esto, se presentará ruido de fase en las subportadoras con lo que podría existir problemas en la obtención de la información. Así mismo, el efecto Doppler en el canal podría afectar de gran manera a la ortogonalidad de las subportadoras. Afectando así al principal objetivo de esta técnica consiste en transmitir y recibir datos a mayor velocidad con una mínima tasa de bit errado (BER) posible.

V. RECOMENDACIONES

- Ronaldo Almachi:

- 1) Para numero total de datos usar un valor que sea múltiplo de 2 y de preferencia que sea al menos 5 veces el tamaño del numero de subportadoras, esto nos ayudara a tener una mejor visualización de la señal OFDM y su respectivo prefijo cíclico.
- 2) Para graficar el espectro en frecuencia de la señal OFDM, usar funciones correspondientes a la transformada de fourier, si se lo hace de otra manera estas tienden a adoptar diferentes formas.
- 3) Usar valores de SNR bajos y altos, con el propósito de comparar el rendimiento en diferentes casos.

- Melanny Dávila:

- 1) Para llegar a conclusiones más exactas acerca de esta técnica de transmisión es importante analizar diferentes técnicas de modulación así como diferentes valores de relación señal a ruido, todo esto con el fin de poder analizar los beneficios y desventajas presentes en su implementación.
- 2) Es de vital importancia garantizar ortogonalidad entre las N subportadoras que se utilizarán para desarrollar esta práctica, para esto se debe tener en cuenta el desplazamiento de fase que debe existir entre ellas.
- 3) El uso de la transformada directa e inversa de Fourier es bastante esencial en esta implementación. Sin embargo, se debe tener cuidado al momento de realizar las gráficas de espectro debido a que únicamente se debe graficar la componente real de los datos obtenidos mediante las mismas.

REFERENCES

- [1] Keysight Technologies, Inc., "Concepts of Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) and 802.11 WLAN", [En línea]. Disponible en: <http://rfmw.em.keysight.com/wireless/helpfiles/89600B/WebHelp/Subsys/tems/wlan-ofdm/content/ofdm-basicprinciplesoverview.htm>.
- [2] "OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)", CableFree. [En línea]. Disponible en: <https://www.cablefree.net/wirelesstechnology/ofdm-introduction/> (accedido ago. 21, 2020).
- [3] E. Tatayo, "GENERACIÓN DE SEÑALES OFDM". C.P. COMUNICACIÓN DIGITAL, Accedido: ago. 21, 2020. [En línea].
- [4] H. F. D. Valencia y N. B. Cantero, "RENDIMIENTO ESPECTRAL DE OFDM EN LAS TASAS DE TRANSMISION DE LAS REDES INALAMBRICAS 802.11X", p. 136.
- [5] "2-Sistemas-OFDM.pdf". [En línea]. Disponible en: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11479/fichero/2-Sistemas+OFDM.pdf> (accedido ago. 21, 2020).
- [6] "Vista de Modulación multiportadora OFDM — Ingeniería". [En línea]. Disponible en: <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/reving/article/view/2699/3891> (accedido ago. 21, 2020).
- [7] "Capitulo3-OFDM.pdf". [En línea]. Disponible en: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11983/fichero/Capitulo+3+-+OFDM.pdf> (accedido ago. 21, 2020).
- [8] "Volumen+1-2F5-MODULACION-OFDM.pdf". [En línea]. Disponible en: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11244/fichero/Volumen+1/252F5-MODULACION-OFDM.pdf> (accedido ago. 21, 2020).
- [9] William Stallings, Wireless Communications and Networks, Second Edition, Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2005. ISBN 0-13-191835-4.