

IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO DE MODULACIÓN Y DEMODULACIÓN DIGITAL UTILIZANDO FSK NO COHERENTE

Kenny F. Limaylla Chamorro
Sección de Postgrado, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
E-mail: kenny@ciplima.org.pe

RESUMEN

En el presente trabajo se desarrolla un sistema de comunicación digital binario, el cual permitirá enviar archivos de audio (formato wav) entre dos computadoras, para lo cual se desarrolló los algoritmos de modulación y demodulación digital, escogiéndose la técnica de modulación FSK (Frequency Shift Keying) coherente, y como desmodulación FSK No Coherente (a fin de abaratar los costos de implementación), el cual presenta buen rendimiento en los medios de comunicación inalámbricos (alta inmunidad a las atenuaciones en amplitud). El sistema de comunicación a desarrollado se probó intercambiando datos entre dos computadoras, las cuales tienen como medio de comunicación un cable de audio. Los algoritmos se desarrollaron en MATLAB.

ABSTRACT

This article develops a binary digital communication system that permit to send and receive audio files in wav format between two personal computers. Such a system employs coherent modulation FSK (Frequency Shift Keying) and Non Coherent FSK (because the phase of the carrier is unknown). Before the implementation, the modulation and demodulation algorithms were simulated using MATLAB. The implementation, the exchange of data between two personal computers, has demonstrated good performance.

INTRODUCCIÓN

Cuando requerimos transmitir información digital sobre un canal pasa banda, es necesario modular la señal de entrada sobre una portadora a una frecuencia fija de acuerdo a los límites impuestos por el canal (Ancho de banda del canal de comunicación). La información a transmitirse si fuese analógico, será convertida a digital (conversión análogo/digital), seguidamente es codificada digitalmente mediante PCM (Pulse Code Modulation).

La información digital a transmitirse es codificada (eliminación de la redundancia), existiendo para ello diferentes técnicas de codificación de fuente (cuantización escalar, cuantización vectorial). Para aprovechar el canal y proteger la información frente a los errores de transmisión, utilizamos técnicas de codificación de canal (códigos lineales, Reed Salomon, Hamming, códigos convolucionales, BCH,

etc.) (referencia 1), los cuales adicionan redundancia a la señal digital a fin de recuperar la señal en caso de produzca errores en la transmisión, finalmente los datos a la salida del codificador del canal, son modulados, existiendo para ello diferentes técnicas de modulación digital (M-ary FSK (Frequency Shift Keying), M-ary PSK (Phase Shift Keying), M-ary QAM (Quadrature Amplitud Modulation), MSK (Minimum Shift Keying), DPSK (Diferencial Phase Shift Keying), etc.).

En el lado de recepción, tenemos un detector digital, en el cual se dispone de un demodulador digital, dentro de los cuales tenemos diferentes métodos de demodulación digital (M-ary FSK, M-ary PSK, M-ary QAM, MSK, DPSK (Diferencial Phase Shift Keying) coherente, DPSK no coherente). El método de demodulación a utilizar depende del tipo de

modulación empleado, a la salida del demodulador digital tendremos un decodificador de canal (Viterbi) para recuperar la señal en caso de errores y finalmente un decodificador de fuente (el cual descomprime la señal), obteniéndose a su salida la información binaria transmitida.

Referente al canal de comunicación digital puede ser un canal telefónico, un enlace de microondas, un enlace satelital, un canal de fibra óptica, etc. En la Figura 1, se muestra el diagrama de bloque de un sistema de comunicación digital.

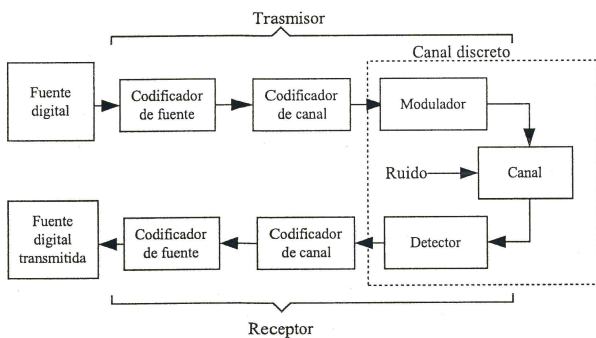


Fig. 1.

CARACTERÍSTICAS DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN

El ruido presente en un sistema de comunicación dependerá del medio de comunicación utilizado (cable coaxial, fibra óptica, enlace satelital, etc.), del mismo modo el ancho de banda (asignado según la capacidad del medio de comunicación).

El método de modulación debe utilizar eficientemente el ancho de banda, ser bastante inmune al ruido del canal de comunicación, y evitar las interferencias entre canales debido a los lóbulos secundarios del espectro de la señal transmitida.

Las consideraciones a tener en cuenta para determinar el sistema de modulación son las siguientes:

- Máxima tasa de bits.
- Mínima probabilidad de error de símbolos.
- Mínima potencia de transmisión.
- Mínimo ancho de banda del canal.
- Máxima resistencia a la interferencia.
- Mínima complejidad del circuito.

SISTEMA DE COMUNICACIÓN DESARROLLADO

En base a las consideraciones mencionadas para determinar un método de modulación, se optó por una modulación FSK, y en el lado receptor por FSK no coherente, el cual permitirá lo siguiente:

- Mínima complejidad del circuito receptor (FSK no coherente no necesita conocer la fase de la portadora), el cual los abaratará.
- Mínima potencia de transmisión.
- Máxima resistencia a la interferencia entre símbolos (el espectro de la señal FSK tiene sus lóbulos secundarios bastante pequeños, lo cual permitirá que la interferencia entre canales sea mínima).

Para eliminar la redundancia de la información digital se utilizará un cuantificador escalar (como codificador de fuente), no se utilizará codificación de canal.

IMPLEMENTACION DEL SISTEMA DE COMUNICACIÓN

El sistema desarrollado, se implementó en una PC, los algoritmos se implementaron en MATLAB (referencia 3), como medio de comunicación se utilizó un cable de audio. La información a transmitirse serán archivos wav de audio.

Para probar el rendimiento del método de modulación FSK, se simuló un canal de comunicación con ruido AWGN (Additive White Gaussian Noise) (referencia 2).

En la Figura 2, se muestra el sistema de comunicación desarrollado, las cajas de circuito transmisor y receptor, contienen los algoritmos implementados, la interface entre la computadora y el medio de transmisión (cable de audio), será la tarjeta de sonido de la computadora.

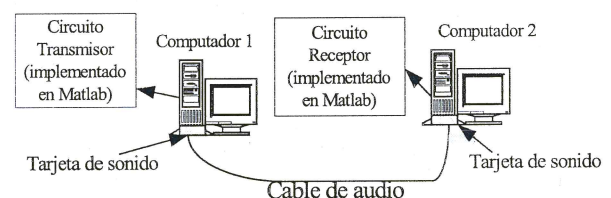


Fig. 2.

SISTEMA DE TRANSMISIÓN

Esta constituido por un bloque quantizador, el cual asigna a cada muestra del archivo wav una etiqueta de 8 bits, un bloque modulador FSK, y bloque de reproducción, el cual trasmitirá la señal modulada por el Line Out de la tarjeta de sonido de la computadora al cable de audio.

En la Figura 3 se muestra el diagrama de bloque del sistema de transmisión (desarrollado en Matlab).

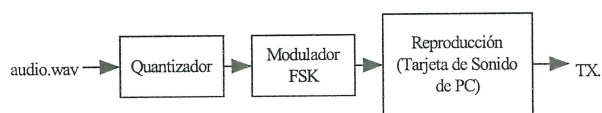


Fig. 3

Quantizador

La función del quantizador es asignar una etiqueta binaria a cada muestra analógica, siendo el número de etiquetas disponibles función del número de niveles del quantizador.

Dentro de la gama de quantizador tenemos diferentes métodos, a citarse:

1. Quantizador escalar: Asigna las etiquetas símbolo por símbolo, dentro de esta categoría tenemos dos tipos de quantizador (uniforme y no uniforme), siendo mejor el quantizador no uniforme, el cual esta básicamente constituido por un compresor (ley μ), seguido de un quantificador uniforme.
2. Quantizador Vectorial: A diferencia del quantificador escalar, la quantización se realiza por bloques de símbolos, este tipo de quantización de mas eficiente en relación al quantificador escalar.

Para el presente trabajo, se utilizo un quantizador escalar, el cual asigna una etiqueta de 8 bits por cada muestra a la señal analógica, disponiéndose en total de 256 niveles.

Algoritmo (desarrollado en Matlab)

```
function [out]=quantizer(in,bpm);
q=round(in*(2^(bpm-1)-1));
```

```
L=length(q);
out=[];
for i=1:L
    l=2^(bpm-1);
    d=q(i)+(2^(bpm-1)-1);% voz de 0 a 255
    for n=1:bpm
        out=[out floor(d/l)];
        d=rem(d,l);
        l=l/2;
    end;
end;
```

Modulador FSK

La función del bloque modulador FSK es modular la secuencia binaria a la salida del quantizador.

En un sistema de FSK binario, cada símbolo 1 y 0, es modulado con una portadora distinta, una típica expresión es estas señales esta dado por:

$$S_1(t) = (2E_b / T_b)^{1/2} * \cos(2\pi f_1 t) \quad T_b \geq t \geq 0$$

$$S_2(t) = (2E_b / T_b)^{1/2} * \cos(2\pi f_2 t) \quad T_b \geq t \geq 0$$

Donde:

f_1, f_2 : Frecuencias de portadora.

T_b : Tiempo de bit (Segundos).

$S_1(t)$: Señal portadoras para el símbolo 1.

$S_2(t)$: Señal portadoras para el símbolo 0.

El circuito de modulación esta constituido por dos portadoras (una por cada símbolo), un circuito inversor (el cual evita que dos símbolos sean transmitidos al mismo tiempo), y un circuito sumador. En la Figura 4 se muestra el diagrama de bloque del modulador FSK empleado (referencia 1).

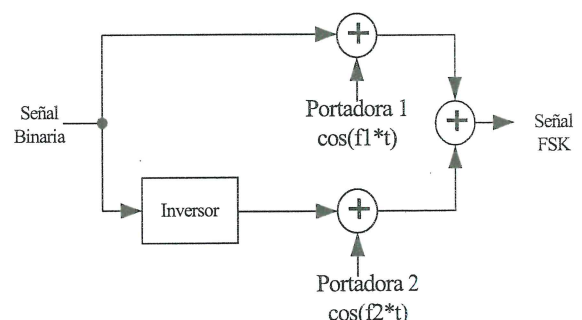


Fig. 4 Diagrama de Bloque del Modulador FSK.

Algoritmo (desarrollado en Matlab)

```
%PARÁMETROS DE MODULACIÓN
Rb=1000;%Tasa de bits
Tb=1/Rb;%Tiempo de bits
Nc=4;%Número entero
Fc=Nc*Rb;%Frecuencia de Portadora
Np=20;%Número Entero: Np>=2
Nd=2000;%Entero para el detector de
Fs=Np*Fc;%Frecuencia de muestreo
N=Fs/Rb;%Número de puntos por cada símbolo
y=dmod(xval,Fc,Rb,Fs,'fsk',2);
```

Reproducción

La función del bloque reproductor es sacar los datos del modulador FSK, por el Line Out de la tarjeta de sonido de la computadora.

Algoritmo (desarrollado en Matlab):

```
[dataL,fs,nbits]=wavread('txpc.wav');
[dataR,fs,nbits]=wavread('txpc.wav');
data=dataR;
ao=analogoutput('winsound');
cha=addchannel(ao,1);
set(ao,'SampleRate',fs);%Fs frecuencia de
muestreo
set(ao,'TriggerType','Manual');
set(ao,'RepeatOut',1);
ActualRate=get(ao,'SampleRate');
putdata(ao,data); %Saca data por Line Out de
tarjeta de %sonido
disp('Press any key to start >>>>');
pause;
start(ao);
trigger(ao);
while strcmp(ao.Running,'On');
end
disp('Reproducción Finalizada');
```

SISTEMA DE RECEPCIÓN

El sistema de recepción estará constituido por un bloque de adquisición de datos a través del Line In de la tarjeta de sonido de la computadora, un bloque demodulador FSK, y un bloque desquantizador, el cual agrupara la señal binaria a la salida del demodulador en grupos de 8 bits (tamaño con que el bloque quantizador en el lado de transmisión codifica cada

muestra del archivo wav transmitido), obteniéndose finalmente el archivo wav transmitido.

Dado que uno de los objetivos en el desarrollo del sistema de comunicación es abaratar costos, se opto por un demodulador FSK no coherente, el cual para demodular no necesita conocer la fase de la portadora, pero una desventaja de este método es que la probabilidad de error de símbolo es mayor comparado con otros métodos de demodulación.

En la Figura 5, se muestra el diagrama de bloques del sistema de recepción implementado.

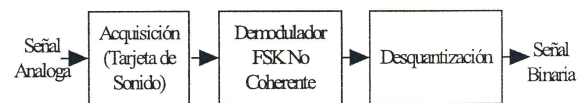


Fig. 5 Diagrama de Bloques del Sistema de Recepción.

Adquisición

La función del bloque adquisición, es leer a través del Line In de la tarjeta de sonido de la computadora, los datos transmitidos desde la otra computadora por el cable de audio.

Algoritmo (desarrollado en Matlab)

```
ai=analoginput('winsound'); %configuración de
tarjeta
chan=addchannel(ai,1); %definición de objeto
canal
duración=15;duración de adquisición
fs=24000; %frecuencia de muestreo
nbits=8; %Número de bits por muestra
set(ai,'SampleRate',fs);%Frecuencia de muestreo
ActualRate=get(ai,'SampleRate');
set(ai,'SamplesPerTrigger',duración*ActualRate);
set(ai,'TriggerType','Manual');
set(ai,'BitsPerSample',8);
disp('Press key to start adquisición >>>');
pause;
start(ai); %inicio de adquisición
trigger(ai);
data=getdata(ai); %lectura de data
data=data';
delete(ai);
disp('Finalizado adquisición');
```

```
wavwrite(data,fs,nbits,'rxcassete.wav');
%pause;
```

Demodulador FSK No Coherente:

Un receptor FSK no coherente es utilizado, cuando se desconoce la fase de la portadora, el la Figura 6, se muestra los diagramas de bloque del receptor FSK no coherente implementado.

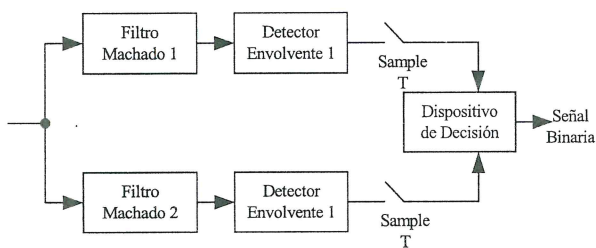


Fig. 6 Diagrama de Bloques de un Demodulador FSK no coherente.

Algoritmo (desarrollado en Matlab)

```
% DE FILTROS MACHADOS
L=[1:N];
Match1=fliplr(cos(2*pi*Fc*L/Fs));%
MACHADO_1
Match2=fliplr(cos(2*pi*(Fc+Rb)*L/Fs)); %
MACH 2
% DETECCIÓN
dbits=[ ];%Vector de bits detectados
Pinicio=1;%Punto de inicio de bit inicial
for i = 1:No_Símbolos
    Pfinal=Pinicio+N-1; %Punto final de bit inicial
    = Tb
    Signal=y(Pinicio:Pfinal);%Señal de entrada en
    un Tb
%DEMODULACIÓN CON FILTROS
MACHADOS
% RAMA 1
Envolverte1=conv(Signal,Match1);
Out1=envelope(Envolverte1,Fs/Nd,Fs);
l1=Out1(N);%Muestreo en t=Tb
%RAMA 2
Envolverte2=conv(Signal,Match2);
l2=Out2(N);%Muestreo en t=Tb
%DISPOSITIVO DE DECISIÓN
if (l1<l2)
```

```
    dbits(i)=1; %Bit detectado 1
    else
        dbits(i)=0; %Bit detectado 0
    end %end de IF
    Pinicio=Pinicio+N; %Nuevo punto de inicio del
    siguiente bit
end %end de FOR
```

Desquantizador

Realiza una función inversa al quantizador, convirtiendo las etiquetas en valores analógicos.

Algoritmo (desarrollado en Matlab)

```
function [out]=desquantizer(in,bpm);
bin=in;% Voz binaria de recepción
L=length(bin); %Longitud en bits
nbit=bpm; %Número de bits por muestra
r=rem(L,nbit);
if r>0
    bin=[bin zeros(1,nbit-r)];
    L=L+(nbit-r);
end;
out=[ ];
for i=1:nbit:L
    d=[ ];
    d=bin(i:i+nbit-1);
    r=2^(nbit-1);
    rt=0;
    for n=1:nbit
        rt=rt+r*d(n);
        r=r/2;
    end;
    out=[out rt];
end;
out=(out-(2^(bpm-1)-1))/(2^(bpm-1)-1);
```

SIMULACIÓN

Para comprobar la eficiencia de los algoritmos desarrollados, se simuló el canal de comunicación, teniendo como medio de comunicación un canal de ruido AWGN (Additive White Gaussian Noise). Obteniéndose la curva de probabilidad de error versus la relación señal a ruido.

El ruido gaussiano, se toma de una distribución de probabilidad gaussiana, con media cero, y densidad

espectral de potencia $No/2$ (referencia 2).

En la Figura 7, se muestra la adición de ruido en un canal AWGN.

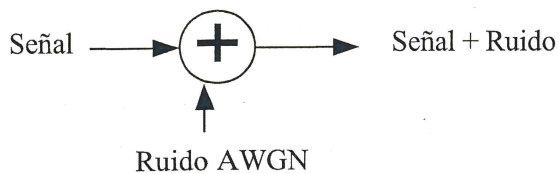


Fig. 7 Adición de Ruido a un Canal de Comunicación.

Algoritmo (desarrollado en Matlab)

```
%SIMULACION DE MODULACION FSK NO
%COHERENTE
clear all;
close all;
%Número de puntos para evaluar gráficas
Nps=20;%Número de puntos en simulación
%PARAMETROS DE MODULACIÓN
Rb=2;%Tasa de bits o Frecuencia de Bits Tb=1/
Rb;%Tiempo de bits (Segundos)
Nc=5;%Número entero
Fc=Nc*Rb;%Frecuencia de Portadora
(Hz)=nc*Rb
Np=5;%Número Entero: Np>=2
Nd=2000;%Entero para el detector de
envolvente Fs=Np*Fc;%Frecuencia de
muestreo: Fs >= 2*Fc
No_Simbolos=100;%Número de símbolos 20
N=Fs/Rb;%Número de puntos por cada
símbolo( 0 o 1)
sbin=randint(1,No_Simbolos); %Señal binaria
%No_Simbolos=length(xval);%Número de
símbolos 20
%I. ETAPA DE MODULACIÓN
%I.1 MODULACIÓN DIGITAL DE SEÑAL EN
FSK
%Modula la señal: y=dmod(Señal
binaria,Fc,Rb,Fs,'Tipo %de
modulación',M_ARY);
%Frecuencia de portadoras de modulación :
f1=Fc y f2=Fc+Rb
y=dmod(sbin,Fc,Rb,Fs,'fsk',2);
%INTRODUCCIÓN DE RUIDO
```

```
Eb=Tb*0.5*Fs;%Energía de bit
No=logspace(1,2,Nps);%Genera Nps puntos
espaciados logarítmicamente
for j=1:length(No)
ruido = sqrt(No(j)/
2)*rand(1,length(y));%Generación de %un
ruido blanco de media 0 y Varianza No/2
yn=y+ruido;%Adiciono ruido a la señal
%II. ETAPA DE DEMODULACIÓN
%II.1. IMPLEMENTACIÓN DE FILTROS
MACHADOS
L=[1:N];
match1=fliplr(cos(2*pi*Fc*L/Fs));%FILTRO
%MACHADO_1 Calcula reversa
match2=fliplr(cos(2*pi*(Fc+Rb)*L/Fs));
%FILTRO %MACHADO_2 Calcula reversa
%II.2. DETECCIÓN
dbits=[ ];%Vector de bits detectados
ti=1;%Punto de inicio de bit inicial
for i = 1:No_Simbolos
tf=ti+N-1; %Punto final de bit inicial = Tb
%signal=yn(ti:tf);%Señal de entrada al
demodulador %II.3. DEMODULACIÓN CON
FILTROS %MACHADOS
%II.3.1. RAMA 1 - DEMODULACIÓN POR
FILTRO %MACHADO_1 Y DETECTOR DE
ENVOLVENTE
Envolvente1=conv(signal,match1);
%Convoluciona %filtro machado con señal
recibida
Out1=envelope(Envolvente1,Fs/
Nd,Fs);%Detector de %envolvente
l1=Out1(N);%Muestreo en t=Tb
%II.3.2. RAMA 2 - DEMODULACIÓN POR
FILTRO %MACHADO_2 Y DETECTOR DE
ENVOLVENTE
Envolvente2=conv(signal,match2);%Convoluciona
%filtro machado con señal recibida
Out2=envelope(Envolvente2,Fs/
Nd,Fs);%Detector de %envolvente
l2=Out2(N);%Muestreo en t=Tb
%II.4. DISPOSITIVO DE DECISIÓN (UMBRAL
DE %DECISIÓN)
if (l1<l2)
dbits(i)=1; %Bit detectado 1
else
dbits(i)=0; %Bit detectado 0
end %end de IF
ti=ti+N;% Nuevo punto de inicio del siguiente
bit
```

```

end %end de FOR
errorVect=xor(sbin,dbits); %Calcula bits
errados
Pe(j)=sum(errorVect)/No_Símbolos;%Cuenta
total de bits %errados
SNR(j)=Eb/No(j);%Relación señal a ruido eb
dB
end %End del FOR de No
pefsknch=Pe;
snrfsknch=SNR;
save pefsknch;
save snrfsknch;
loglog(SNR,Pe);%Plotea Pe Simulado vs SNR
en escala %logarítmica en ambos ejes
title('Performance de FSK No Coherente en un
Canal %Gaussiano');
xlabel('Eb/No dB');
ylabel('Probabilidad de Error');
legend('Simulado Pe de FSK No Coherente');
grid;
zoom on;

```

RESULTADOS OBTENIDOS

En la Figura 8, se muestra la grafica de probabilidad de error versus relación señal a ruido den dB, para FSK no coherente, obtenido como resultado de la simulación.

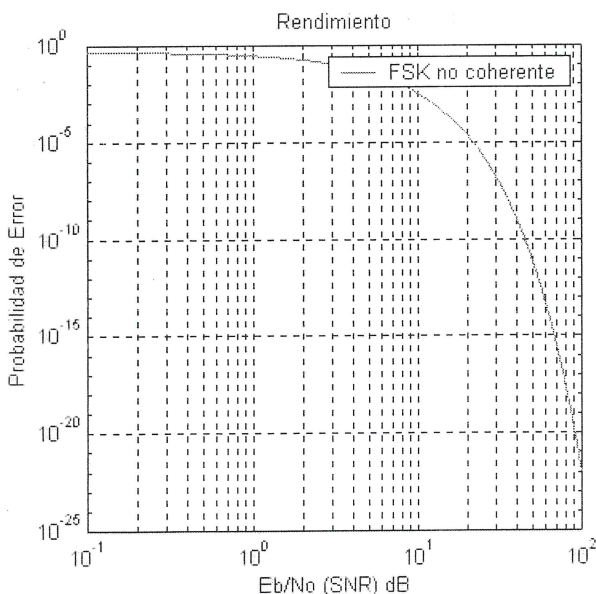


Fig. 8 Curva de Probabilidad de error.

De la curva de probabilidad de error versus la relación Energía de bit a ruido (SNR) en dB (decibelio) se concluye lo siguiente :

- La probabilidad de error disminuye con el incremento de SNR.
- Para una SNR baja, la probabilidad de error es la varianza del ruido ($N_0/2$).

CONCLUSIONES

El ancho de banda de un sistema FSK al tener dos portadoras, es mayor, lo cual es una desventaja.

Un incremento de la potencia de transmisión, aumenta los costos de implementación, pero el sistema de comunicación es mas inmune al ruido.

En sistemas donde se necesita evitar la interferencia entre canales o hacerlo menos perceptible, el FSK es una buena opción, ya que en su espectro, sus lóbulos secundarios se atenúan rápidamente.

Desarrollar un receptor FSK No Coherente es mas barato en comparación de un FSK Coherente.

El circuito de recepción de un receptor FSK no coherente es mas complejo que un receptor FSK coherente.

Una desventaja de FSK es el requerimiento de mayor ancho de banda, pero esto se compensa con el requerimiento de un menor nivel de potencia de transmisión para un mismo rendimiento de probabilidad de error frente a otros métodos de modulación.

En este trabajo se ha demostrado que los algoritmos de comunicación desarrollados, permiten la transmisión de datos entre computadoras.

Se implementaron algoritmos, los cuales son la base para el desarrollo practico y comercial en DSP (Digital Signal Processor).

AGRADECIMIENTOS

A la Sección de Postgrado de la FIEE por brindarme las facilidades del caso para desarrollar este trabajo y al Dr. Guillermo Kemper Vazques, por su asesoramiento y por ser un ejemplo de superación a seguir.

REFERENCIAS

1. **Simon Haykin**, "Digital Communications, Ed. Hardcover" 1988.
2. **John G. Proakis**, "Digital Communications", Ed. Mc-Graw Hill, 1995.
3. **Communications Toolbox**, "for use with MATLAB, MATH WORKS", 1997.