

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



**MODELAMIENTO DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN
DIGITAL**

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO ELECTRÓNICO

PRESENTADO POR:

Daniel Rojas Huamani

**PROMOCIÓN
2001 - II**

**LIMA – PERÚ
2005**

MODELAMIENTO DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN DIGITAL

SUMARIO

Dado el auge de las comunicaciones digitales, el presente tema de suficiencia presenta un esquema que simula un sistema de comunicación digital, el cual realiza el cálculo del BER (Bit Error Rate). Dicho parámetro es lo que determina la calidad de todo sistema de comunicación digital, el procesamiento de señal digital se realiza con la herramienta simulink del matlab 6.5, luego del análisis y de las simulaciones, concluimos que la SNR (relación señal a ruido), es el factor que determina el éxito del receptor en interpretar la señal recibida luego de la demodulación, se evalúa el BER para diversos valores de SNR, el cual relaciona el parámetro E_s / N_0 (relación energía a ruido) y la potencia de transmisión.

El tema se inicia con un marco conceptual que permite situarnos en el contexto del informe, seguido de la etapa emisora y receptora, luego se dan las consideraciones para un canal de comunicación y se finaliza con la simulación de un sistema de comunicación digital, evaluando diferentes parámetros de entrada y presentando resultados muy próximos a los sistemas reales de comunicación digital.

ÍNDICE

PRÓLOGO

CAPÍTULO I

MARCO CONCEPTUAL

1.1	Generalidades	2
1.1.1	A/D - D/A	3
1.1.2	Código de Línea / Decodificador de Línea	3
1.1.3	Codificación de Canal / Decodificación de Canal	4
1.1.4	Modulación / Demodulación	4
1.1.5	Tx / Rx	4
1.1.6	Canal de Comunicación	5
1.2	Origen	5
1.3	Alcance	6
1.4	Objetivo	6
1.5	Principios	6
1.6	Fundamentos	7

CAPÍTULO II

ETAPA EMISORA

2.1	Emisor	8
2.2	Señal Banda Base	8
2.2.1	Señales	8
2.2.2	Señal Analógica	11
2.2.3	Señal Discreta	12
2.2.4	Señal Digital	13

2.2.5 Señal Banda Base	13
2.2.6 Muestreo	14
Muestreo Ideal	15
Muestreo Natural	19
Muestreo con retenedor de orden cero	22
2.2.7 Cuantificación	22
Errores y ruido de cuantificación	25
Cuantificación uniforme	26
Cuantificación logarítmica	26
Cuantificación no uniforme	27
Cuantificación vectorial	27
2.2.8 Codificación	27
2.3 Código de Línea	28
2.3.1 Código Bipolar AMI	30
2.4 Codificación de Canal	31
2.4.1 Códigos Matriciales	34
2.4.2 Códigos Cíclicos	35
2.4.3 Códigos Convolutivos	35
2.4.4 Codificador Convolutivo (2,1,3)	36
Diagrama del árbol o árbol del código	39
Diagrama de estados	39
Diagrama de Trellis o enrejado	39
2.4.5 Diagrama de Trellis	42
2.5 Modulación	44
2.5.1 Transmisión por desplazamiento de fase cuaternaria (QPSK)	45
2.6 Transmisión	47
2.6.1 Consideraciones de ancho de banda para la transmisión QPSK	50

CAPÍTULO III

ETAPA RECEPTORA

3.1 Receptor	51
3.2 Recepción	51

3.2.1 Receptor QPSK	51
3.3 Demodulación	52
3.4 Decodificador de Canal	52
3.4.1 Descripción del Algoritmo de Viterbi	54
3.5 Decodificador de Línea	62
3.5.1 Decodificador	62
3.5.2 Circuito retenedor de orden cero	62
3.5.3 Filtro análogo posterior	62

CAPÍTULO IV

CANAL DE COMUNICACIÓN Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN DIGITAL

4.1 Introducción	63
4.2 Análisis de Fourier	63
4.3 Ancho de banda de un canal de comunicación	65
4.4 Velocidad de transmisión	67
4.5 Capacidad de un canal de comunicación (Teorema de Nyquist)	71
4.6 Teorema de Shanonn	73
4.7 Banda Base y Banda Ancha	74
4.8 Imperfecciones en un canal de comunicación	75
4.8.1 Ruido	75
4.8.2 Atenuación	77
4.8.3 Distorsión	77
4.8.4 Interferencia	77
4.9 Simulación de un sistema de comunicación digital	77
4.9.1 Descripción de la simulación del sistema de comunicación digital	79
Simulación N° 1	81
Simulación N° 2	83
Simulación N° 3	85
Simulación N° 4	87
Simulación N° 5	89

CONCLUSIONES

APÉNDICE A

APÉNDICE B

BIBLIOGRAFÍA

PRÓLOGO

El presente tema de suficiencia tiene como fin, asentar las bases conceptuales para comprender las etapas básicas de todo sistema de comunicación digital, siendo el parámetro BER el que mide la calidad de toda comunicación digital, al final se presenta un esquema de simulación que calcula la probabilidad de error (BER). En el presente trabajo no se realiza una comunicación en tiempo real ni se llega al grado de sincronización entre el transmisor y receptor.

Se considera un marco conceptual, donde se dan los alcances necesarios para la comprensión del tema, se explican las etapas emisora y receptora, y se finaliza con la descripción y consideraciones de un canal de comunicación.

CAPÍTULO I

MARCO CONCEPTUAL

1.1 Generalidades

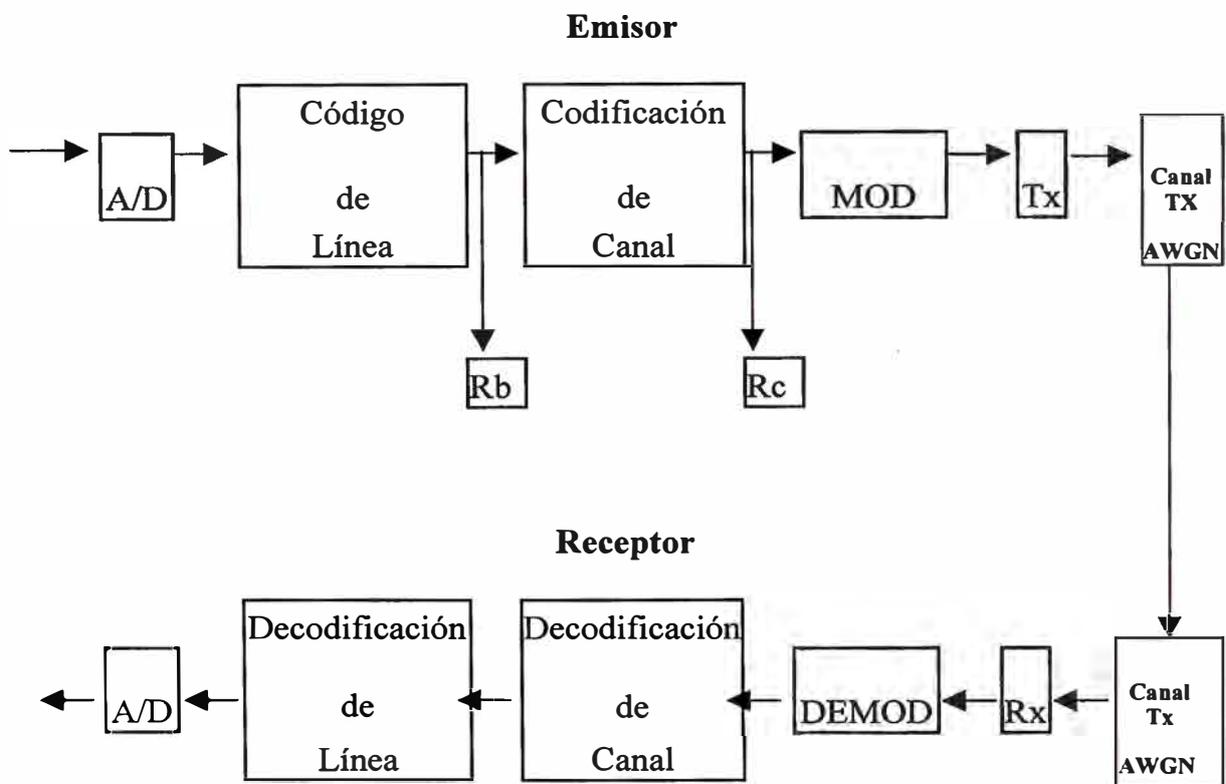


Fig.1.1. Diagrama de bloques de un sistema de comunicación digital.

El origen de un sistema de comunicación analógico o digital lo encontramos en la necesidad de establecer una transferencia de información entre dos puntos

inicialmente separados una distancia variable D , hoy en día el método más rápido, eficiente y de mayor cobertura es la transmisión y recepción de señales en forma eléctrica, visto de esta manera mencionaremos conceptos básicos que intervienen en todo proceso de comunicación. Ver Fig.1.1, adicionalmente el parámetro R_b muestra la velocidad de datos, el parámetro R_c muestra la velocidad de codificación equivalente a la velocidad de transmisión y representa los bits que se transmite en forma real.

De la Fig.1.1, observamos que un sistema de comunicación digital consta de las siguientes etapas:

1.1.1 A/D - D/A

Este bloque es el encargado de convertir una señal análoga de entrada, en una señal digital en la etapa emisora (A/D), la cual es procesada en todo el sistema de comunicación digital, al término del proceso de comunicación digital, realiza la conversión de señal digital a señal análoga de salida (D/A) o señal deseada en la etapa final del receptor.

1.1.2 Código de Línea / Decodificador de Línea

Un código de línea es el que representa por medio de valores de tensión o corriente los bits que deseamos transmitir desde la etapa emisora, existen muchos códigos de línea. En el presente tema de suficiencia veremos el código de línea AMI en la etapa transmisora, en la etapa receptora se realiza el proceso inverso, es decir, de los

valores de tensión o corriente se obtiene una representación de bits, los cuales entran al conversor digital – analógico para devolver la señal esperada.

1.1.3 Codificación de Canal / Decodificación de Canal

La codificación de canal permite realizar un mapeo de la secuencia de bits producida por un código de línea, en otra secuencia de entrada al canal, en este proceso se agregan bits de redundancia en la transmisión los cuales permiten obtener una comunicación confiable, tal como veremos más adelante, en el lado del receptor se elimina dicha redundancia, algunas codificaciones del canal son capaces de detectar y corregir errores.

1.1.4 Modulación / Demodulación

En este proceso en la etapa emisora se realiza una correspondencia entre bits de entrada en símbolos de salida, es importante tener en cuenta que los símbolos de salida son analógicos, los cuales llevan información digital; en la etapa receptora se da correspondencia de símbolos recibidos en bits de entrada al decodificador de canal.

1.1.5 Tx / Rx

El transmisor es el que se encarga de llevar los símbolos analógicos al canal de RF deseado para su propagación mediante una portadora, en el receptor se elimina dicha portadora y se obtiene los símbolos en teoría libre de errores. En sistemas de comunicaciones digitales la calidad se mide por el BER, es decir la probabilidad de que un bit llegue con error.

1.1.6 Canal de Comunicación

Un canal de comunicación es el medio físico entre el transmisor y el receptor, el cual limita la capacidad de transferencia debido a las imperfecciones, en la Fig.1.1 se considera un canal con ruido gaussiano, blanco y aditivo (AWGN).

1.2 Origen

Desde la aparición del hombre, siempre se ha tenido la necesidad de intercambiar información entre seres de su misma naturaleza, en un principio tenemos como primera forma de comunicación las señales visuales como son: señales de humo, espejos, entre otras, su evolución así como su expansión sobre la Tierra, lo obligaron a desarrollar estos medios de comunicación hasta lograr las comunicaciones que conocemos hoy en día. El método más rápido, eficiente y de mayor cobertura es la transmisión y recepción de mensajes en forma eléctrica.

Mencionaremos la evolución de las comunicaciones sin entrar en detalle en cuanto a las fechas exactas, daremos fechas aproximadas pero valederas:

- Uso de teléfonos y micrófonos 1880.
- Emisión de señales de ondas de radio, así como telegrafía inalámbrica 1900.
- Amplificadores de radio, transmisión de ondas de radio por modulación en amplitud 1920.
- Creación de radares y cable coaxial 1930.
- Transmisión de ondas de radio por modulación en frecuencia, aparición del servicio de radiodifusión por televisión en base a tubos de vacío 1940.

-Aparición del transistor 1950.

-Aparición del Láser 1960.

-Aparecen las comunicaciones vía satélites artificiales 1970.

-Transmisiones espaciales, servicios de telefonía celular, comunicaciones personales PCS, RDSI 1990.

Hoy en día tenemos integración de redes, servicios de comunicaciones avanzados y servicios diferenciados al 2005.

1.3 Alcance

El presente tema de suficiencia tiene por alcance modelar un sistema de comunicación digital en forma genérica aplicable a cualquier requerimiento de comunicación.

1.4 Objetivo

El presente tema de suficiencia tiene por objetivo, dar a entender las etapas básicas de un sistema de comunicación digital, realizando el análisis de la señal original emitida por una fuente hasta la recepción de la misma en un destino.

1.5 Principios

Mencionaremos los principios básicos y fundamentales para poder entender un sistema de comunicación digital.

Se indicó que hoy un día el método más rápido, eficiente y de mayor cobertura es la comunicación de mensajes en forma eléctrica, para ello requerimos conocer ciertos principios:

- Representar matemáticamente las señales eléctricas.
- Entender los tipos de modificaciones a las que se someten dichas señales eléctricas para ser adaptadas al medio de transmisión.
- Reconocer los diferentes medios de transmisión.
- Tener presente los problemas básicos de todo sistema de comunicación digital tales como el ruido, al cual es necesario encontrarle una descripción estadística así como saber diferenciar otros elementos indeseables como son distorsión, atenuación, interferencia y perturbaciones.
- Adicionalmente, es necesario tener en cuenta las imperfecciones en un sistema de comunicación digital, por ejemplo se presentan interferencias o perturbaciones, las cuales escapan a nuestro control.

1.6 Fundamentos

Los fundamentos teóricos utilizados serán explicados en el desarrollo del presente tema así como en la exposición del mismo, se ha tomado como referencia los estudios de ante-grado, capacitaciones permanentes y experiencia laboral principalmente en la parte de comunicaciones inalámbricas y en radiocomunicación.

CAPÍTULO II

ETAPA EMISORA

2.1 Emisor

Podemos considerar al emisor como la primera etapa para establecer una comunicación entre dos puntos separados una cierta distancia D .

2.2 Señal Banda Base

Definimos algunos conceptos que nos permitan situarnos en el contexto del presente tema de suficiencia.

2.2.1 Señales

En el mundo real, encontramos numerosas señales tanto naturales como las producidas por el hombre, como son la variación del aire cuando hablamos, los ascensos y descensos diarios de la temperatura ambiental, las señales eléctricas periódicas que genera el corazón, dichas señales en su mayoría son analógicas y nos representan información, por consiguiente las señales transportan información e incluyen cantidades físicas tales como voltaje, corriente e intensidad, por ello

mencionamos al inicio que las señales están presentes en el mundo real y estas son de diferente naturaleza.

En cada una de las áreas del conocimiento, las señales utilizadas son de distinta naturaleza, por ejemplo en acústica se trata de señales generadas por fuentes de sonido como la voz, la música o cualquier clase de ruido; en control de procesos pueden ser señales de tipo térmico, mecánico o eléctrico, generadas por los procesos mismos; en medicina pueden ser señales eléctricas o magnéticas generadas por el organismo humano; en sismología se trata de señales mecánicas, es decir, movimientos de la corteza terrestre. Sin embargo, todas ellas tienen algo en común, cada señal tiene una o más características que reflejan el comportamiento de uno o varios fenómenos físicos; es decir, que en alguna de sus características contiene información acerca de los fenómenos físicos que determinan su comportamiento.

Analizaremos una señal cualquiera por ejemplo en el área de la sismología, el fenómeno físico participante en la generación de un sismo es el movimiento brusco de las capas que forman la corteza terrestre, como estos movimientos generalmente son de tipo impulsivo, producen a su vez, movimientos en la superficie terrestre, ocasionando lo que se conoce como un sismo, dicho movimiento tiene ciertas características, tales como intensidad y naturaleza ondulatoria.

Cualquier persona que haya estado presente durante un sismo, recordará que conforme avanza el tiempo los movimientos de la tierra cambian de sentido, se

percibe una especie de vaivén o de sube y baja y, afortunadamente, también conforme avanza el tiempo, la intensidad de los movimientos disminuye hasta que todo vuelve a su estado inicial de reposo.

Esta dependencia del tiempo es una de las características más importantes de la mayoría de las señales, formalmente, las características de la señal son una función del tiempo.

Daremos algunos ejemplos para terminar de ilustrar estos conceptos.

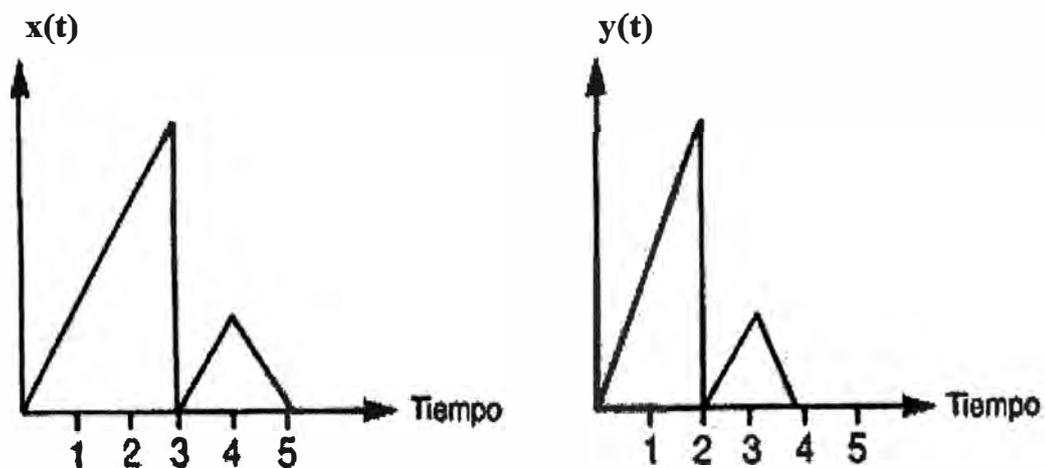


Fig.2.1. La figura muestra las señales $x(t)$ e $y(t)$, ambas en el dominio del tiempo.

En los gráficos de la Fig.2.1, se observan que las señales $x(t)$ e $y(t)$ varían de una manera continua en función del tiempo, esto significa que conforme avanza el tiempo las señales adquiere valores continuos en amplitud dentro de un intervalo continuo de tiempo, es decir, estas señales son continuas en tiempo y en amplitud.

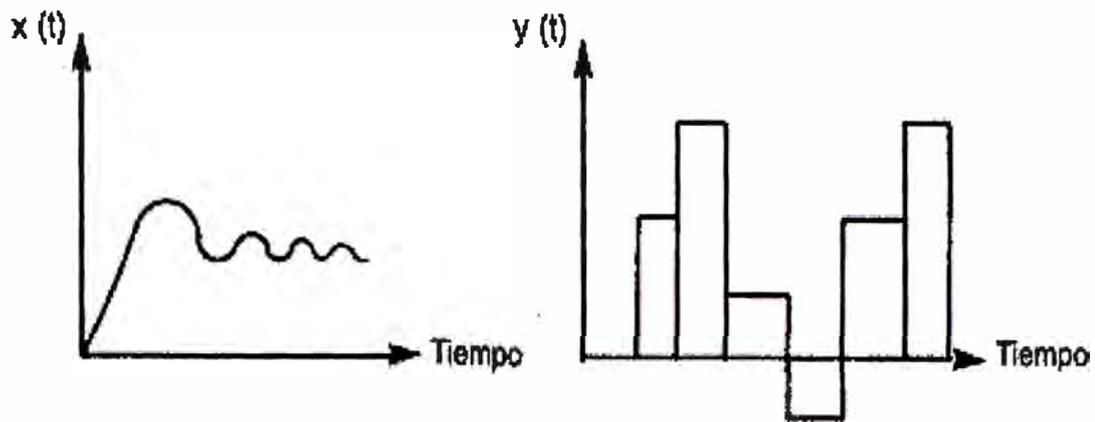


Fig.2.2. Ambas señales son continuas en el tiempo, siendo $x(t)$ continua en amplitud e $y(t)$ discreta en amplitud.

En el caso de la Fig.2.2, ilustramos una señal $x(t)$ que es continua en el tiempo y continua en amplitud, y una señal $y(t)$ que es continua en el tiempo pero discreta en amplitud.

Las señales analógicas han sido tema de mucho estudio en el pasado, en décadas recientes, las señales digitales han recibido una atención cada vez más amplia, han dominado gran parte del campo de las comunicaciones ya que pueden conservar su contenido de información con mayor facilidad que las señales analógicas, son más inmunes al ruido y se logra optimizar recursos.

2.2.2 Señal Analógica

Definimos una señal analógica $x(t)$, a aquella señal que puede tomar infinitos valores dentro de un rango finito de valores para un intervalo de tiempo continuo t , como por

ejemplo la variación de temperatura durante el día o una señal sinusoidal como la mostrada en la Fig.2.3.

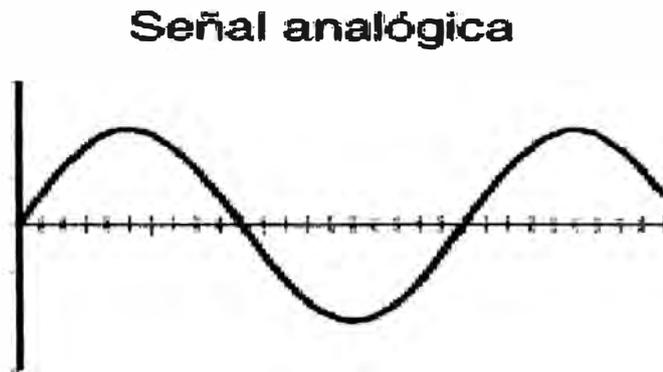


Fig.2.3. Señal análoga.

2.2.3 Señal Discreta

Las señales discretas pueden surgir en forma natural, como por ejemplo, al representar anualmente el número de habitantes de un país, o como consecuencia de tomar valores (muestras) de la señal $x(t)$ espaciados a tiempos t_s , en este caso tenemos una señal discreta en tiempo discreto, cada valor (muestra) tomado a tiempos t_s tiene un valor numérico, ver Fig.2.4.

Señal muestreada

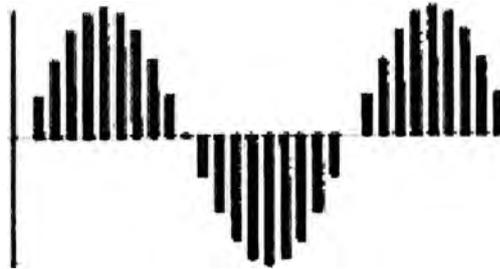


Fig.2.4. Señal discreta en el tiempo y en amplitud.

2.2.4 Señal Digital

Una señal digital es aquella que solo puede tener un número finito de valores representado por 0s y 1s dentro de un rango finito de valores, referido a lo anterior, bastaría representar el valor (muestra) numérico tomado a intervalos de tiempos t_s por un equivalente en binario, de esa manera tendríamos una señal digital a partir de la señal $x(t)$ analógica.

2.2.5 Señal Banda Base

Definimos como señal banda base, a la señal que sale de la fuente de información original, por ejemplo la señal emitida por un teléfono convencional o la de una cámara de televisión, son señales del tipo analógicas, mientras que las señales emitidas por un puerto serie o paralelo de una computadora o de un puerto Ethernet RJ-45 en las redes de área local, son señales del tipo digital.

Dos conclusiones muy importantes, de lo mencionado hasta ahora son:

-La señal banda base es la señal que lleva la información.

-La señal banda base puede ser analógica o digital.

De lo anterior, es de interés obtener señales digitales para modelar nuestro sistema de comunicación digital y de hecho hoy en día un gran porcentaje de aplicaciones busca obtener señales digitales para darle diversos tratamientos dependientes de los servicios y/o aplicaciones que se deseen brindar.

Consideremos el caso más general, es decir, partimos de señales analógicas, para poder modelar un sistema de comunicación digital, entonces como primer paso sería obtener una señal digital a partir de una señal analógica, ello es obtenido mediante las siguientes etapas:

2.2.6 Muestreo

La etapa inicial para obtener una señal digital a partir de una señal análoga se denomina muestreo y consiste en tomar valores (muestras) de la señal análoga en intervalos de tiempo siempre constantes, si una señal análoga presenta variaciones lentas en un determinado intervalo de tiempo, unos pocos valores (muestras) de dicha señal serán necesarias posteriormente para reconstruirla, en forma similar, en caso la señal análoga presente variaciones rápidas en el mismo intervalo de tiempo serán necesarias tomar una cantidad mayor de valores (muestras) para su reconstrucción.

Dada una señal análoga $x(t)$, debemos muestrearla (tomar valores de la señal $x(t)$) a intervalos uniformes t_s , con lo cual obtenemos la señal discreta $x(nt_s)$ donde n es un

valor entero, intuitivamente al reconstruir la señal $x(t)$ a partir de $x(nt_s)$ conduce a una pérdida potencial de información, lo cierto es que la señal $x(t)$ puede ser muestreada y reconstruirse sin pérdida de información, si es de banda limitada a una frecuencia f_{MAX} , es decir la velocidad de muestreo debe ser F_s mayor o igual a $2f_{MAX}$, lo que implica tomar muestras a un periodo T_s o t_s (periodo de muestreo), siendo este valor la inversa de F_s o f_s (frecuencia de muestreo), esto se ilustra en la Fig.2.5.

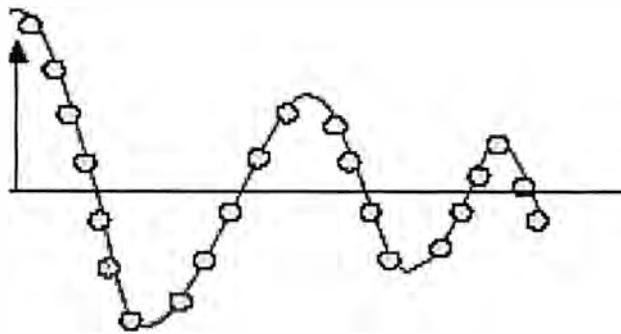


Fig.2.5. Dada una señal analógica cualquiera, se muestrea tomando valores de su amplitud a intervalos de tiempo constante, referencia [4].

a) Muestreo ideal

Supongamos que tenemos una señal analógica $x(t)$ cuya transformada $X(f)$ tiene la siguiente forma:

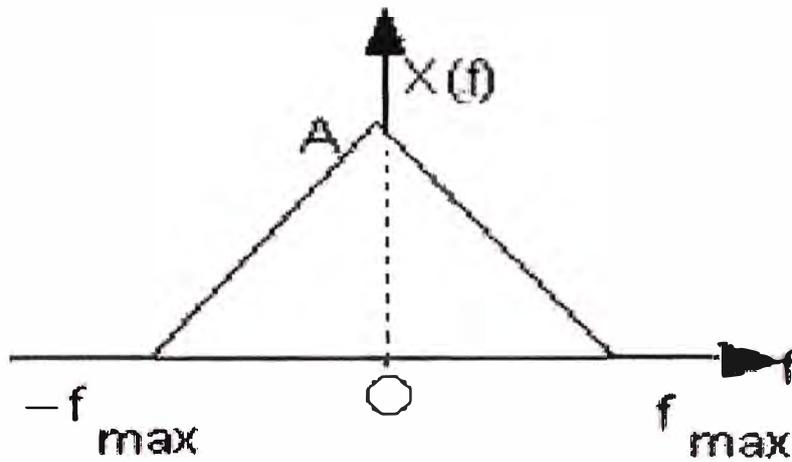


Fig.2.6. Espectro de la señal $x(t)$.

Por ejemplo las señales de voz para telefonía básica, en la práctica tienen un valor máximo de frecuencia igual a $f_{MAX} = 4\text{KHz}$.

Se pueden tomar muestras de la señal multiplicándola por un tren de impulsos periódicos de periodo t_s , tal y como se muestra en la Fig.2.7, a esto se le llama muestreo ideal.

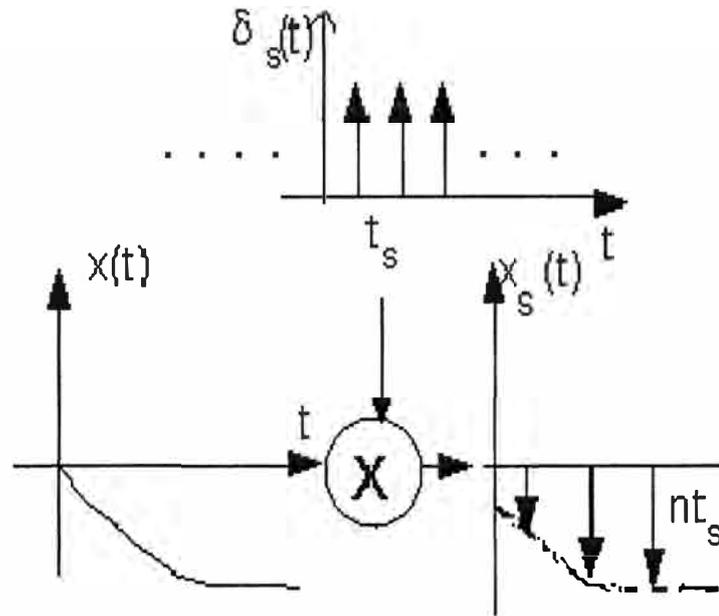


Fig.2.7. Muestreo ideal.

Es decir:

$$X_s(t) = X(t) * \delta_s(t) \quad (2.1)$$

$$X_s(t) = \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} X(n * t_s) * \delta(t - n * t_s) \quad (2.2)$$

En el dominio de la frecuencia se tendrá que:

$$F \left[\sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - n * t_s) \right] = (1 / t_s) * \left[\sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(f - n * f_s) \right] \quad (2.3)$$

Por lo tanto, llamando f_s al inverso de t_s , se tendrá que:

$$X_s(f) = f_s * X(f) * \left[\sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(f - n * f_s) \right] \quad (2.4)$$

La convolución de una función cualquiera con una función delta reproduce a la función en el punto donde ocurre la delta y así:

$$X_s(f) = f_s * \left[\sum_{n=-\infty}^{\infty} X(f - n * f_s) \right] \quad (2.5)$$

De manera que el espectro de la señal muestreada será el siguiente:

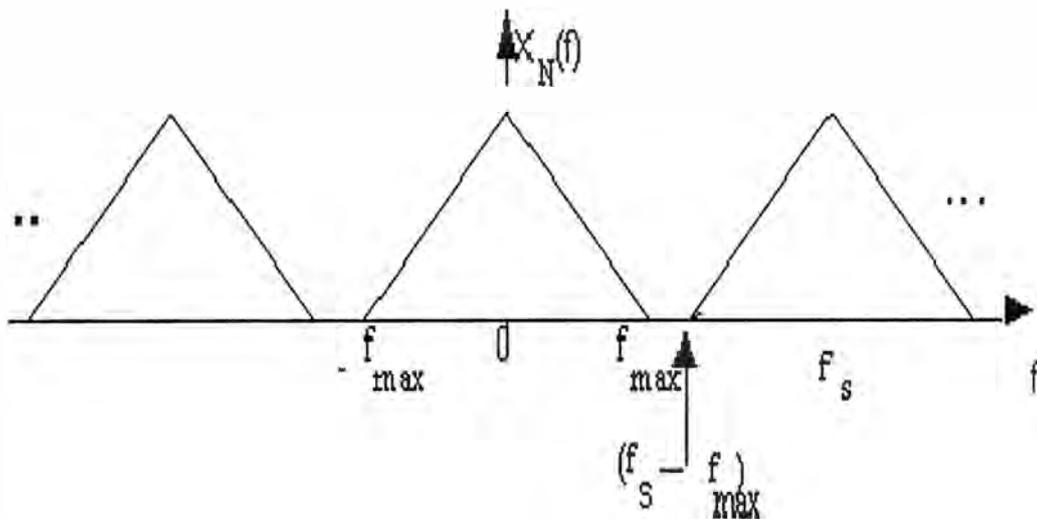


Fig.2.8. El espectro se repite cada f_s .

El espectro de la señal original se repite cada f_s . Si quisiéramos rescatar la señal original, bastaría utilizar un filtro pasa bajo (LPF) ideal pero esto siempre y cuando la frecuencia mínima de muestreo sea $f_s = 2f_{MAX}$ muestras por segundo, dicho valor se conoce como frecuencia de Nyquist, si se muestrea a una frecuencia inferior a la de Nyquist los espectros de la señal muestreada se solaparán y no se podrá recuperar el mensaje original, dicho efecto se le llama aliasing.

b) Muestreo Natural

El muestreo natural equivale a pasar la señal $x(t)$ por un interruptor que se abre y cierra cada t_s segundos, la acción del interruptor puede modelarse como un tren de pulsos periódicos de altura unitaria $P(t)$, con periodo t_s y ancho de pulso τ , la señal muestreada $x_N(t)$ es igual a la señal $x(t)$ durante los τ segundos que el interruptor permanece cerrado y es cero cuando el interruptor se abre.

Presentamos un esquema práctico:

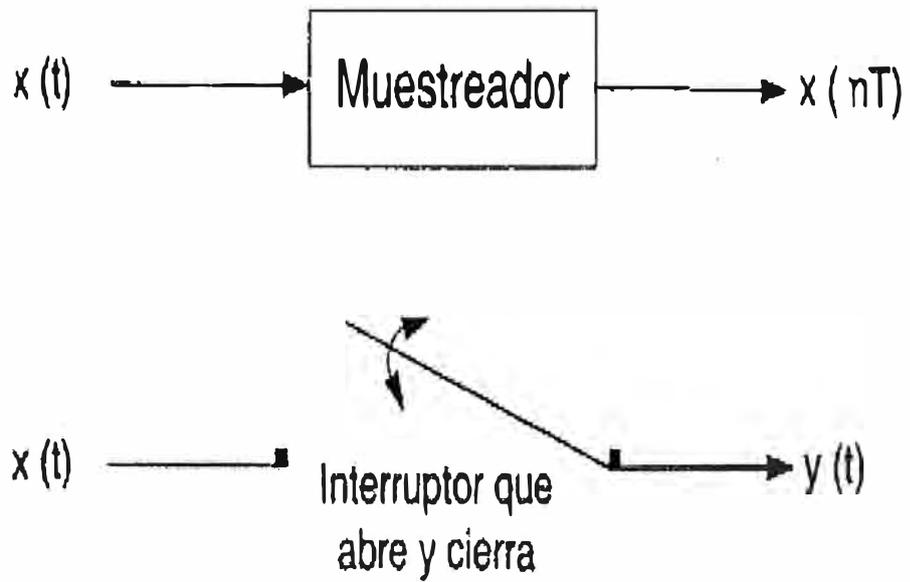


Fig.2.9. Esquema equivalente al muestreo natural.

La señal en tiempo luciría como sigue:

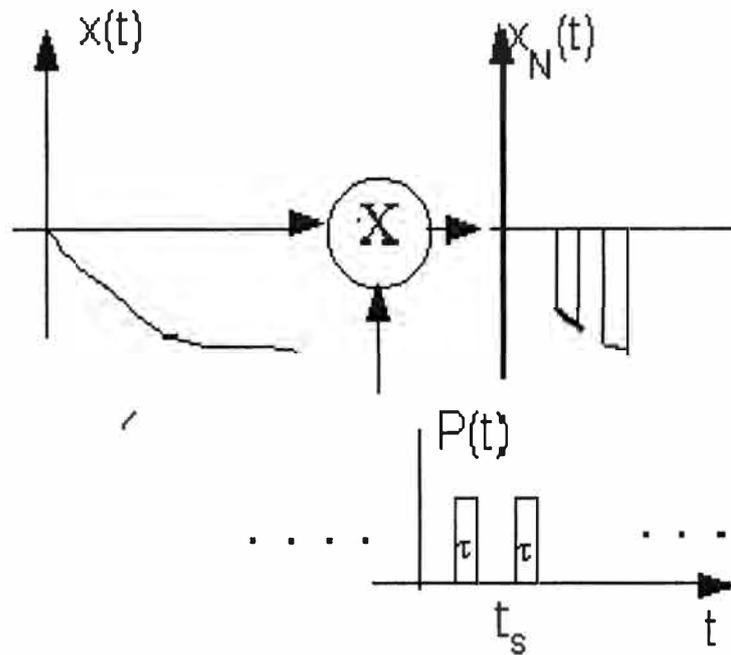
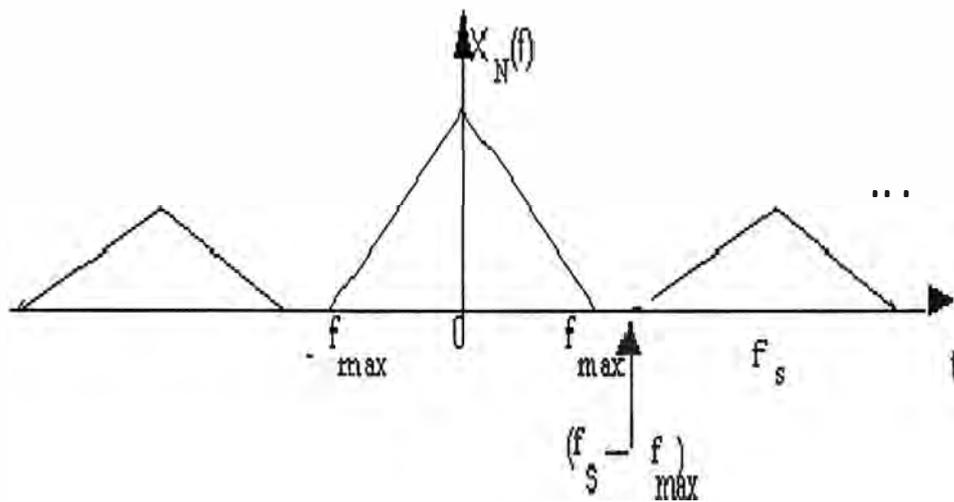


Fig.2.10. Muestreo Natural.

El espectro sería:

Fig.2.11. El espectro se repite cada f_s , notamos que esta atenuado.

En este caso la señal $x(t)$, al igual que en el muestreo ideal, se puede recuperar con un filtro pasa bajo.

c) Muestreo con retenedor de orden cero

En la práctica las señales analógicas son muestreadas empleando dispositivos de retención de orden cero, los cuales mantienen en memoria el valor de la muestra adquirida, hasta que se adquiera el valor de la siguiente muestra, esto se conoce también como muestreo de techo plano, esta operación equivale a un muestreo ideal seguido de un sistema cuya respuesta al impulso $h(t)$ es un pulso de altura unitaria y duración $T = t_s$

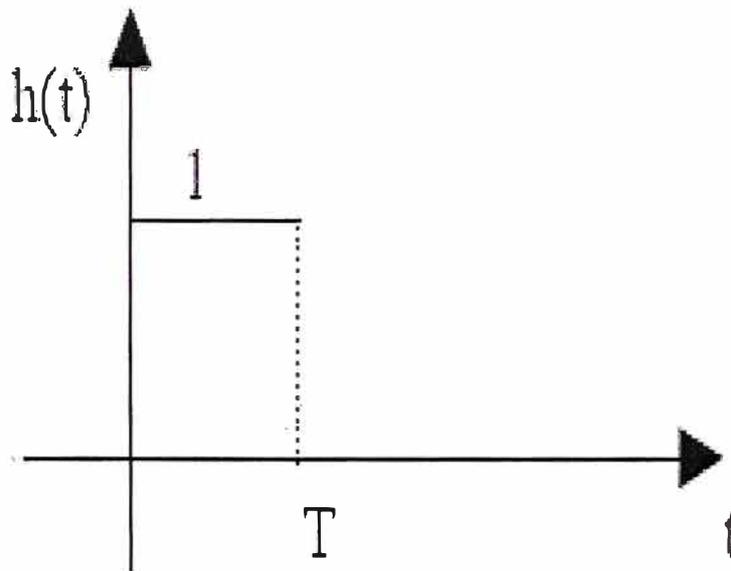


Fig.2.12. Muestreo con retenedor de orden cero.

2.2.7 Cuantificación

El muestreo y la cuantificación forman el eslabón crítico entre las señales analógicas y las señales digitales, en paralelo al muestreo se debe realizar la cuantificación de la señal analógica, es decir, una vez obtenida la muestra $x(nt_s)$ de la señal analógica $x(t)$,

dicha muestra (valor de la señal analógica) se mide y se asigna un determinado valor dentro de una escala de valores que se usa para medir la señal $x(t)$.

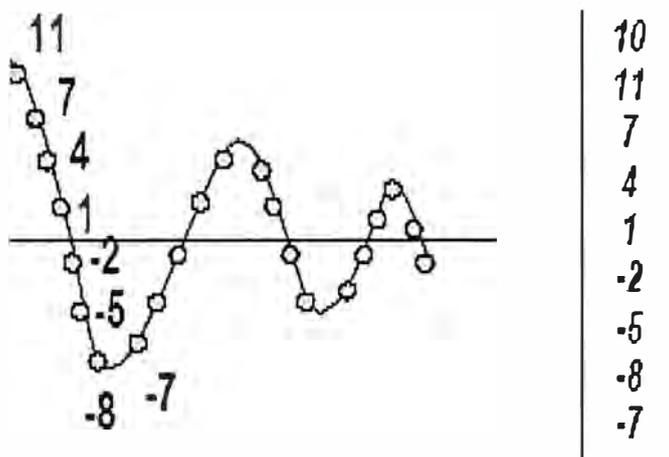


Fig.2.13. A cada muestra se le asocia un valor, referencia [4].

Lo anterior, parte del hecho que debemos procesar señales digitales, debido a las limitaciones de memoria finita de los procesadores, cpu's u otros, sólo es posible procesar secuencias finitas de datos, por tanto, no basta con muestrear la señal analógica en el tiempo sino también se requiere cuantificar, redondear o truncar las amplitudes de las señales para reducirlas a un conjunto finito de valores manejables, la cuantificación afecta a la amplitud de la señal, entonces las señales cuantificadas de tiempo discreto reciben el nombre de señales digitales.

De lo anterior, cada muestra cuantificada estaría representada por un grupo de ceros y unos, cuanto más fina sea la cuantificación, mayor será grupo de ceros y unos para representar la muestra, al igual que el muestreo, la cuantificación impropia conduce a pérdida de información, con la diferencia que sin importar cuán fina sea la

cuantificación, sus efectos son irreversibles, ya que las longitudes de los grupos son necesariamente finitos, por ello los cuantificadores siempre introducen ruido, cuyos efectos se describen en términos estadísticos.

El tipo más usual de cuantificador, es el cuantificador uniforme, en que los niveles son todos iguales, la mayoría usan un número de niveles que es una potencia de 2, si $L = 2^B$, cada uno de los grupos o niveles es codificado a un número binario de B bits.

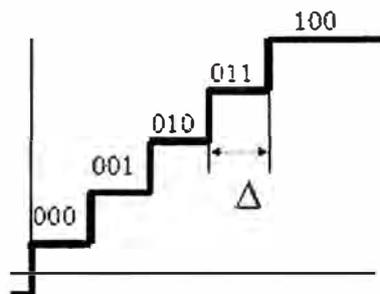


Fig.2.14. Cuantificación de señal.

En el gráfico de la Fig.2.14, tenemos que $B = 3$, es decir $L = 8$ niveles.

El número de niveles L de la mayoría de los cuantificadores es potencia de 2, cada uno de los niveles de L , quedará codificado en un número binario y cada valor de la señal quedará representado en forma binaria como una palabra de B bits, la cual corresponde a su valor cuantificado, otro ejemplo, en un cuantificador de 4 bits se ofrece 16 niveles (2^4), la señal puede cuantificarse mediante redondeo al nivel de cuantificación más próximo o por truncamiento al nivel menor que el siguiente superior.

a) Errores y ruido de cuantificación

Si llamamos $x_s[n]$ a la señal discreta y $x_q[n]$ a la señal discreta cuantificada, entonces definimos el error a la siguiente expresión:

$$\xi[n] = X_s[n] - X_q[n] \quad (2.6)$$

Se define la relación señal a ruido de cuantificación SNR_Q como la relación entre la potencia P_s de la señal y la potencia P_N del error, medido en decibelios.

$$P_s = (1/N) * \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} X_s^2[n] \quad (2.7)$$

$$P_N = (1/N) * \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} \xi^2[n] \quad (2.8)$$

$$SNR_Q(\text{dB}) = 10 * \log(P_s/P_N) = 10 * \log \left[\frac{\sum_{n=-\infty}^{n=\infty} X_s^2[n]}{\sum_{n=-\infty}^{n=\infty} \xi^2[n]} \right] \quad (2.9)$$

Resumiendo, se conoce como error de cuantificación (o ruido), a la diferencia entre la señal de entrada (sin cuantificar) y la señal de salida (ya cuantificada), obviamente interesa que el ruido sea lo más bajo posible, para conseguir esto, se pueden usar técnicas como:

b) Cuantificación uniforme

En los cuantificadores uniformes (o lineales) la distancia entre los niveles de reconstrucción es siempre la misma, no hace ninguna suposición acerca de la naturaleza de la señal a cuantificar, no son los más óptimos, son los más fáciles de usar y los menos costosos.

c) Cuantificación logarítmica

Las señales de voz pueden tener un rango dinámico superior a los 60 dB, por lo que para conseguir alta calidad de voz se deben usar un elevado número de niveles de reconstrucción, interesa que la resolución del cuantificador sea mayor en las partes de la señal de menor amplitud que en las de mayor amplitud, por ello el cuantificador anterior desperdiciaría niveles de reconstrucción y por ende ancho de banda, esto se puede mejorar incrementando la distancia entre los niveles de reconstrucción conforme aumenta la amplitud de la señal.

Un método sencillo para conseguir esto es haciendo pasar la señal por un compresor logarítmico antes de la cuantificación, esta señal comprimida puede ser cuantificada uniformemente, a la salida del sistema, la señal pasa por un expansor, que realiza la función inversa al compresor, a esta técnica se le llama compresión, su principal ventaja es que es fácil de implementar y funciona razonablemente bien con señales distintas a la de la voz, para llevar a cabo la compresión existen dos funciones muy utilizadas: Ley-A (utilizada principalmente en Europa) y Ley-B (utilizada en EEUU).

d) Cuantificación no uniforme

El problema de la cuantificación uniforme es que conforme aumenta la amplitud de la señal, también aumenta el error, este problema lo resuelve el cuantificador logarítmico de forma parcial, sin embargo, si conocemos la función de distribución de probabilidad, podemos ajustar los niveles de reconstrucción a la distribución de forma que se minimice el error cuadrático medio, esto significa que la mayoría de los niveles de reconstrucción se den en la vecindad de las entradas más frecuentes y, consecuentemente se minimice el error o ruido.

e) Cuantificación vectorial

En los métodos anteriores, cada muestra se cuantificaba independientemente a las muestras vecinas, sin embargo, la teoría demuestra que ésta no es la mejor forma de cuantificar los datos de entrada, resulta más eficiente cuantificar los datos en bloques de N muestras, el proceso es sencillamente una extensión de los anteriores métodos escalares descritos anteriormente, en este tipo de cuantificación, el bloque de N muestras se trata como un vector N -dimensional.

La cuantificación vectorial ofrece mejores resultados que la cuantificación escalar, sin embargo, es más sensible a los errores de transmisión y lleva consigo una mayor complejidad computacional.

2.2.8 Codificación

De los dos procesos anteriores, hasta ahora hemos obtenido una secuencia de valores en $x(nT_s)$ correspondientes a las muestras de $x(t)$ en intervalos de tiempos fijos,

dichos valores son codificados, es decir, para cada valor obtenido se le asigna una representación binaria expresando dichos valores mediante un conjunto de 0s y 1s con lo cual tenemos una señal digital lista para darle el procesamiento requerido, ver Tabla N° 2.1.

Valor	Código
10	1010
11	1011
7	111
4	100

ver TABLA N° 2.1

Representación de la señal codificada:



Fig.2.15. Representación de bits.

Luego de obtener los bits que representan el valor de la muestra, el siguiente paso es elegir el código de línea para representar dichos bits.

2.3 Código de Línea

Al referirnos a un esquema de comunicación digital, los factores que determinan el éxito del receptor en interpretar la señal recibida son:

- La relación señal a ruido (o mejor E_b/N_0).
- La velocidad de transmisión.

-El ancho de banda.

Con los otros factores mantenidos constantes, son válidos los siguientes enunciados:

-Un incremento en la velocidad de transmisión incrementa la tasa de errores (la probabilidad de que un bit llegue con error).

-Un incremento de la relación S / N hace disminuir la tasa de errores.

-Un incremento del ancho de banda permite aumentar la velocidad de transmisión.

Existe un factor adicional para mejorar la calidad de un sistema de comunicación digital y este es la utilización de un esquema de codificación o más propiamente un código de banda base.

Un esquema de codificación de banda base consiste en mapear los bits de datos en los elementos de señal, existe una variedad de enfoques, en el presente tema utilizaremos el código AMI.

Los aspectos a evaluar en la elección de los códigos de línea son los siguientes:

-Espectro favorable para la transmisión, es decir una ausencia de componentes de alta frecuencia significa que se requiere menos ancho de banda para la transmisión.

-Corriente directa igual a cero ($DC = 0$), una ausencia de componente directa es deseable, cuando una señal tiene una componente de corriente continua, debe haber una conexión física directa entre los medios de transmisión, si no hay componente continua (DC), se puede utilizar acoplamiento vía transformadores, este hecho proporciona un aislamiento eléctrico excelente, lo cual reduce la interferencia.

-Buen reloj, es decir la capacidad de sincronización de señal, el receptor debe determinar lo más exactamente el inicio y el fin de un bit, para este efecto podría requerir de un reloj de sincronización separado, algunos códigos evitan este requerimiento.

-Detección de error, es decir la capacidad de detectar errores de la señal, se deben tener alguna capacidad de detectar los errores, algunos códigos la tienen por su propia naturaleza.

2.3.1 Código Bipolar AMI

Es un código multinivel bipolar conocido también como AMI (Alternate Mark Inversión), tiene su ancho de banda centrado en la mitad de la velocidad de transmisión con la ventaja de no tener componente continua y proporcionar cierta capacidad de detectar errores, debido a que los 1's sucesivos deben tener signos opuestos.

Como desventaja es que no tiene la capacidad de sincronizar la cual se manifiesta cuando se transmite una secuencia larga de 0's (es decir no hay transiciones), el problema se puede resolver mediante la prohibición de secuencias largas de 0's o adicionar seguido del código un desorden de bits para evitar la secuencia de 0's en este caso.

En el código AMI se tiene que, un bit 0 se codifica como en ausencia de señal, es decir, 0 voltios y un bit 1 como nivel +V o -V, alternando según los unos sucesivos, ver TABLA N° 2.2.

Estado	Tensión
Reposo	0
0	0
1	Cambia en función de la tensión del último bit

ver TABLA N° 2.2

A continuación se da un ejemplo de codificación de la cadena 01001100011.

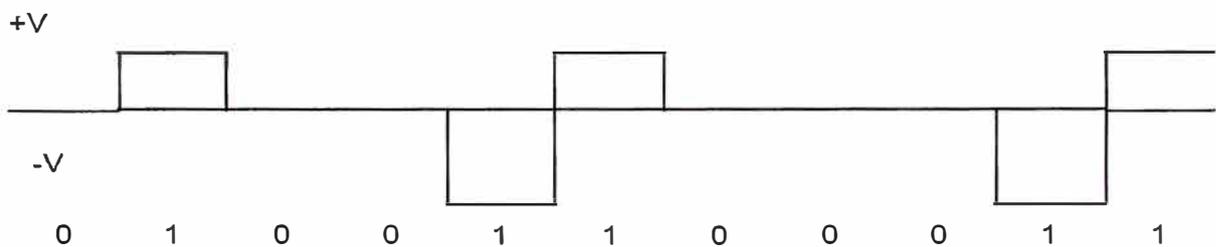


Fig. 2.16. Representación de bits en forma alternada, según código AMI.

2.4 Codificación de Canal

La codificación de canal consiste en realizar un mapeo (añadir redundancia) de una secuencia de datos entrante en una secuencia de entrada al canal y realizar el mapeo inverso a la salida del canal en una secuencia de datos tal que los efectos del ruido están minimizados, la introducción de redundancia en la codificación de canal tiene como finalidad mejorar la confiabilidad de la transmisión.

La codificación de canal es capaz de detectar y corregir errores, para determinar con exactitud cuantos bits son capaces de detectar y cuantos bits es capaz de corregir un código determinado, se utiliza la teoría de mensajes, tema que no abordaremos en el presente tema.

Al desarrollarse una transmisión, puede darse el caso en que el receptor interprete un valor lógico contrario al que fue enviado por el transmisor, por ello con el objeto de minimizar los errores introducidos durante la transmisión de las señales se introducen mecanismos de detección de errores y de corrección de errores, estos mecanismos se basan en la transmisión de una serie de bits redundantes que son interpretados en recepción y permiten, ya sea detectar o incluso corregir errores de transmisión.

De lo anterior concluimos que la codificación de canal, son código de protección y corrección de errores, podemos realizar algunas observaciones:

¿Protección contra qué?

Contra errores.

¿En qué consisten los errores?

En que el receptor dice que la señal recibida es un 1 lógico, cuando en realidad es un 0 lógico y viceversa.

¿A qué se deben los errores?

A las pérdidas, a la distorsión, a la interferencia y sobre todo al ruido, que se agrega a la señal en el canal de comunicación, cabe resaltar que aun no existe una defensa absoluta contra el ruido, debido a los siguientes factores:

- Es aleatorio, esto es, no tiene una ecuación que lo defina.
- Penetra desde el exterior y también se produce en el interior de los dispositivos.
- Ocupa la misma banda espectral que las señales del mensaje que deseamos transmitir.

¿Cuántos tipos de códigos de protección hay?

Entre las muchas clasificaciones existentes, las fundamentales son códigos para detectar y códigos para corregir errores, como son:

- ARQ (Acknowledgment Request), requiere canal de retorno.
- FEC (Forward Error Correction), no requiere canal de retorno.

¿Qué es detectar?

Detectar es determinar si hay o no errores en el mensaje recibido, sin saber con precisión cuáles son los bits errados.

¿Qué es corregir?

Corregir es determinar con certeza cuáles son los bits errados, una vez que se sabe cuál bit está errado, la corrección es trivial, es decir basta con sustituir el bit errado por su negado.

¿En qué consiste la protección?

Consiste en agregar cierta cantidad de bits al mensaje que se desea transmitir, hay algoritmos para determinar cuales y cuantos bits se agregan y lo que se debe hacer en el receptor con tales bits.

Intuitivamente es comprensible que es más fácil decir si hay errores que decir cuales son, es decir, es más sencillo y más barato un código para detectar que uno para corregir.

Tipos de Codificación de Canal:

En esencia hay 3 familias, seguidamente las mencionaremos.

2.4.1 Códigos Matriciales

Son códigos lineales, separables, es posible separar los bits de datos de los de redundancia, realizados mediante matrices, los principales códigos son:

- Hamming.
- Bit de paridad.
- Goley.
- Reed Solomon.

Códigos usados por lo general para transmisión a bajas velocidades.

2.4.2 Códigos Cíclicos

Los códigos cíclicos, son aquellos en los que cualquier desplazamiento cíclico de una palabra de código da lugar a otra palabra de código, realizados mediante polinomios, poseen una subdivisión general:

-Sistemáticos.

-No sistemáticos.

Códigos usados por lo general para transmisión a bajas velocidades.

2.4.3 Códigos Convolucionales

Los códigos convolucionales, son códigos del tipo secuenciales, tienen como propiedad principal la dependencia del estado anterior, se realiza mediante registros de desplazamientos, sus valores utilizan suma de modulo 2, este sistema tiene memoria y la codificación actual depende de los datos que se envían ahora y de los datos que se enviaron antes que los primeros, usados para transmitir a altas velocidades, en el presente tema vamos a desarrollar un FEC a $\frac{1}{2}$.

Un código convolucional queda especificado por tres parámetros (n,k,m), los cuáles se describen a continuación:

“**n**” es el número de bits de la palabra codificada.

“**k**” es el número de bits de la palabra de datos.

“**m**” es la memoria del código o longitud restringida.

Un ejemplo del código que explicaremos, es el código convolucional (2,1,3), donde:

- La palabra codificada tiene 2 bits de longitud.
- La entrada son bloques de 1 bits.
- La salida depende de los dos bloques anteriores y del actual.

2.4.4 Codificador Convolutacional (2,1,3)

Se mencionará el proceso para la codificación, la palabra codificada se obtendría como el resultado de realizar una serie de operaciones lógicas entre determinados bits que están almacenados en los registros intermedios.

Se presenta el esquema que generará la codificación respectiva:

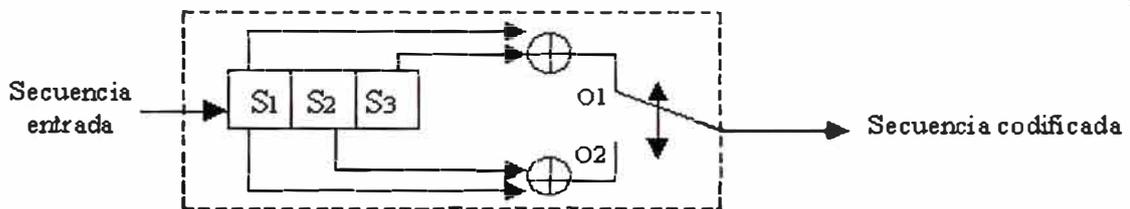


Fig.2.17. Lógica del codificar convolutacional, referencia [5].

El conmutador con las dos entradas hace el papel de un registro de desplazamiento de dos estados.

El código convolutacional es generado introduciendo un bit de datos y dando una revolución completa el conmutador.

Inicialmente se supone que los registros intermedios contienen ceros. La palabra codificada se obtiene como resultado de sumas módulo 2 entre los bits indicados, los cuales están almacenados en los registros intermedios.

La secuencia de la salida para el código descrito anteriormente se muestra en la siguiente tabla. Ver TABLA N° 2.3.

Entrada	Salida
S3,S2,S1	O1,O2
000	00
001	11
010	01
011	10
100	10
101	01
110	11
111	00

ver TABLA N° 2.3

Daremos un ejemplo de funcionamiento de este código, supongamos que se requiere enviar la secuencia de bits **0101**, donde los bits situados más a la derecha son los más antiguos, el proceso de codificación es el siguiente:

Dada la secuencia **0101**, se requiere codificarla.

Se introduce el primer bit de la secuencia en el codificador.

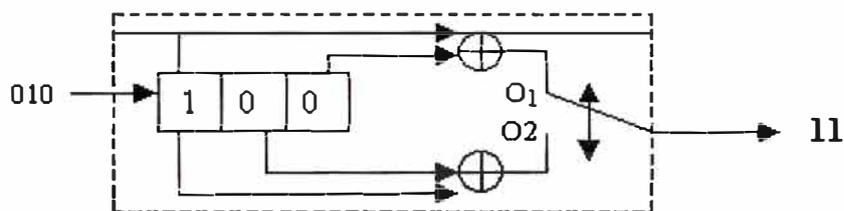


Fig.2.18. Secuencia para el primer bit de entrada, referencia [5].

Se introduce el segundo bit de la secuencia en el codificador.

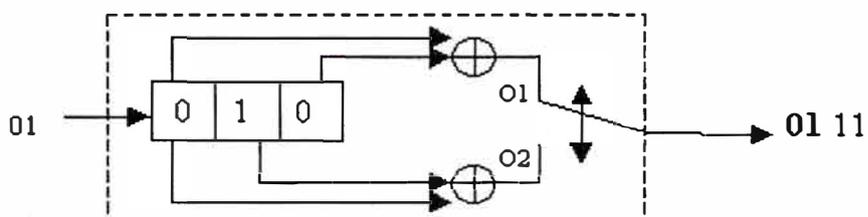


Fig.2.19. Secuencia correspondiente al segundo bit de entrada, referencia [5].

Se introduce el tercer bit de la secuencia en el codificador.

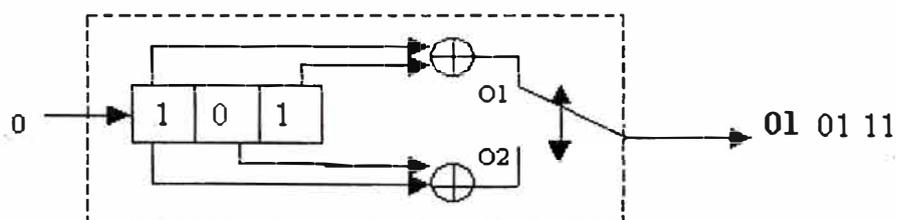


Fig.2.20. Secuencia correspondiente al tercer bit de entrada, referencia [5].

Se introduce el cuarto bit de la secuencia en el codificador.

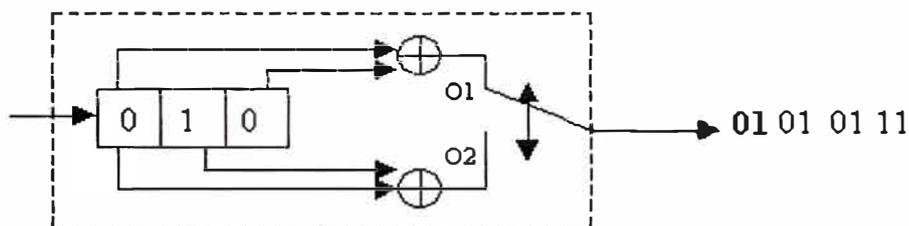


Fig.2.21. Secuencia correspondiente al cuarto bit de entrada, referencia [5].

Al final del proceso de codificación obtenemos que la secuencia codificada correspondiente a la entrada 0101 es 01 01 01 11 .

Debido a la memoria del código, es necesario disponer de medios adecuados para determinar la salida asociada a una determinada entrada, en esencia existe tres métodos gráficos, mencionamos brevemente los mismos:

a) Diagrama del árbol o árbol del código

Es una representación mediante un árbol binario de las distintas posibilidades.

b) Diagrama de estados

Es una representación de los diferentes estados de salida y es la forma menos utilizada.

c) Diagrama de Trellis o enrejado

Es un diagrama en forma de red, que permite realizar la codificación y la decodificación de la secuencia binaria.

Para el ejemplo del codificador anterior (2,1,3), presentamos el siguiente árbol del código, tener presente que un código (n,k,m) tiene una profundidad de árbol $2*(m-1)$ y el número de estados es $2^{(m-1)*k}$.

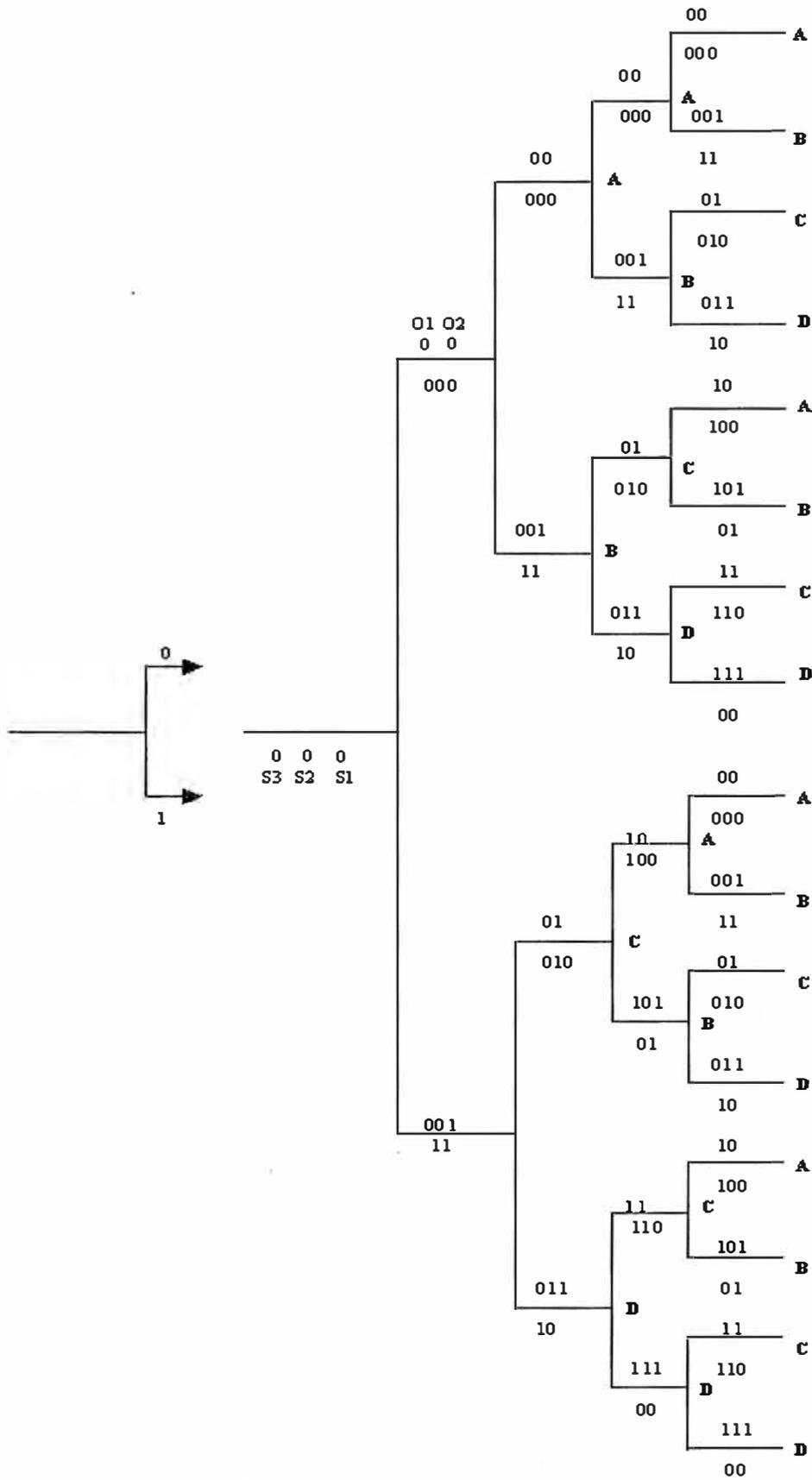


Fig.2.22. Diagrama del árbol, referencia [5].

La interpretación del árbol del código es la siguiente:

-Hay dos ramas en cada nodo.

-La rama superior corresponde a una entrada de un 0 lógico.

-La rama inferior corresponde a una entrada de un 1 lógico.

-En la parte exterior de cada rama se muestra el valor de salida.

-El número de ramas se va multiplicando por dos con cada nueva entrada.

-A partir del segundo nivel el árbol se vuelve repetitivo, en realidad solo hay cuatro tipos de nodos: **A**, **B**, **C** y **D**, estos tipos de nodos en realidad son los estados del codificador, a partir de estos nodos se producen los mismo bits de salida y el mismo estado, por ejemplo, de cualquier nodo etiquetado en nuestro esquema como nodo **C** se produce el mismo par de ramas de salida:

Salida **10** y estado **A**, o

Salida **01** y estado **B**.

-A partir de la identificación de los estados del codificador se puede incorporar esta información en el Diagrama de Trellis.

2.4.5 Diagrama de Trellis

Es un diagrama en forma de red, en la cual cada línea horizontal corresponde a uno de los estados del codificador, cada línea vertical corresponde a uno de los niveles del árbol del código.

Partimos del estado inicial del codificador en el primer nivel del árbol, a partir de aquí se trazan dos líneas desde este estado, una para el caso de que la siguiente entrada fuera un valor lógico 0 y otra para el caso de un valor lógico 1.

Estas líneas irán hasta el siguiente nivel del árbol al estado en el que queda el codificador después de haber codificado las correspondientes entradas, encima de cada una de estas líneas escribiremos la salida del codificador para esa codificación, seguidamente, para cada nivel del árbol hacemos lo mismo desde todos los estados en los que el codificador se puede encontrar.

Según lo descrito anteriormente, el Diagrama de Trellis para el codificador (2,3,1) de nuestra exposición será:

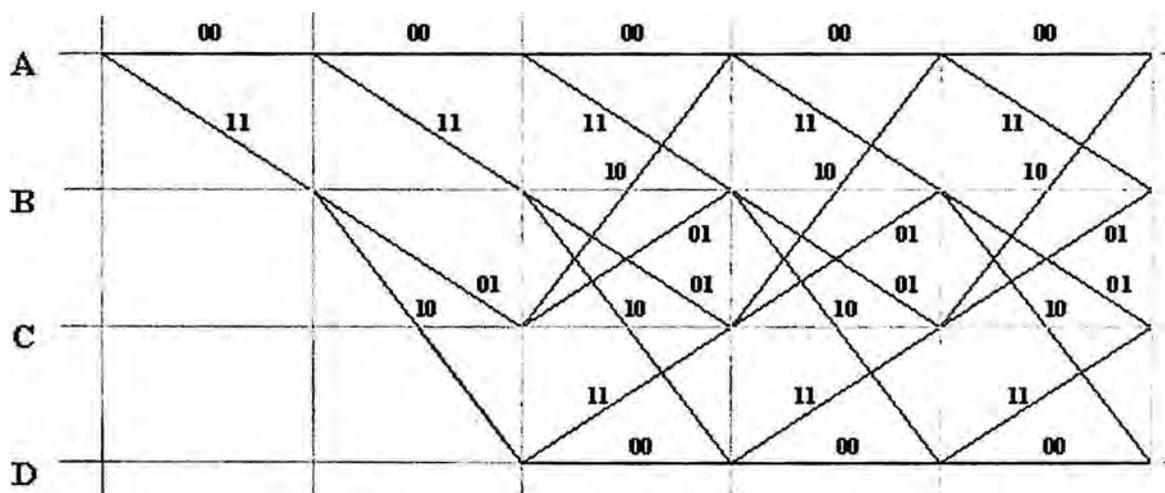


Fig.2.23. Diagrama de Trellis, referencia [5].

Seguidamente, vamos a seguir el diagrama anterior para codificar la secuencia de bits **0101**.

Secuencia de entrada: **1 0 1 0**

Secuencia codificada: **11 01 01 01**

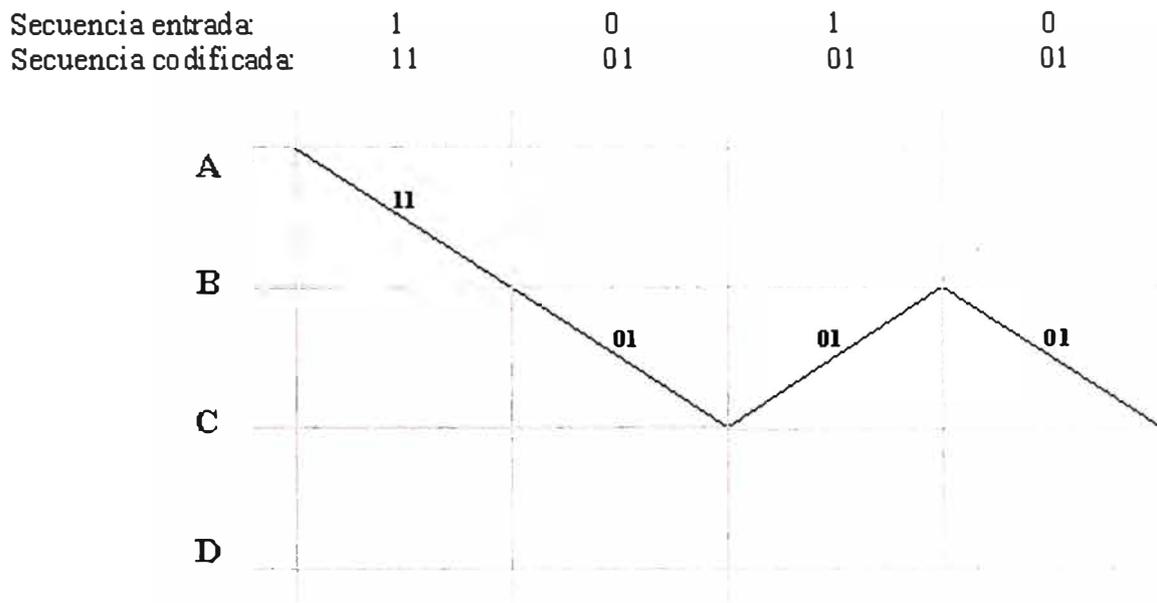


Fig.2.24. Camino o ruta más óptima, referencia [5].

2.5 Modulación

La modulación es el proceso por el cuál se altera o modifica (modula) sistemática los parámetros de una onda llamada portadora (carrier) en función de otra onda o señal llamada mensaje o señal moduladora (señal que deseamos transmitir).

Si la señal utilizada para la modulación es una señal analógica se habla de modulación analógica, si la señal útil es de naturaleza digital estaríamos hablando a modulaciones digitales.

La portadora es generalmente una onda sinusoidal teóricamente pura y la definimos como: $c(t) = v * \cos(w_c t + \xi)$ (2.10)

En la ecuación de la portadora vemos que hay tres parámetros: La amplitud v , la frecuencia f_c o velocidad angular w_c y la fase ξ , el mensaje (señal que deseamos transmitir) puede influir en uno de ellos o en dos o en los tres al mismo tiempo, así mismo cada uno de los tres parámetros puede ser modificado simultáneamente por un mensaje diferente, dependientes del diseño del transmisor.

Un aspecto importante, es que el mensaje hace variar los parámetros de la portadora en forma proporcional, las variaciones no proporcionales no están prohibidas, pero no se utilizan.

En el caso de mensajes analógicos, el parámetro alterado (amplitud, frecuencia o fase de la portadora) puede tener un número infinito de posibles valores, en el caso de mensajes digitales, el parámetro alterado podrá tener tantos valores como niveles de voltaje tenga el mensaje.

En el caso de modulación digital, se transforman los bits en señales analógicas (símbolos) que llevan información digital, como por ejemplo un MODEM convierte bits a símbolos para transmitirlos por un canal convencional.

2.5.1 Transmisión por desplazamiento de fase cuaternaria (QPSK)

M-ario es un término derivado de la palabra binario, la M es sólo un dígito que representa el número de condiciones posibles, por ejemplo en las técnicas para modulación digital FSK y PSK sólo hay dos condiciones posibles de salida, una representa un 1 lógico y la otra un 0 lógico, por tanto son sistemas M-ario donde $M =$

2, con la modulación digital, con frecuencia es ventajoso codificar a un nivel más alto que el binario, un sistema de PSK, con cuatro posibles fases de salida, es un sistema M-ario en donde $M = 4$, si hubiera ocho posibles fases de salida, sería $M = 8$, matemáticamente,

$$N = \log_2 M \quad (2.11)$$

En donde $N =$ número de bits.

$M =$ número de condiciones de salida posibles con N bits.

La transmisión por desplazamiento de fase cuaternaria QPSK, o en cuadratura PSK, como a veces se le llama, es otra forma de modulación digital angular de amplitud constante, la QPSK es una técnica de codificación M-ario, en donde $M = 4$ (de ahí el nombre de cuaternaria que significa 4), con QPSK son posibles cuatro fases de salida, para una sola frecuencia de la portadora, debido a que hay cuatro fases de salidas diferentes, tiene que haber cuatro estados o condiciones de entrada diferentes, ya que la entrada digital a un modulador de QPSK es una señal binaria (base 2), para producir cuatro condiciones diferentes de entrada, se necesita más de un solo bit de entrada, con 2 bits de entrada, hay cuatro posibles condiciones: 00, 01, 10 y 11, en consecuencia, con QPSK, los datos de entrada binarios se combinan en grupos de 2 bits llamados di-bits, cada código di-bits genera una de las cuatro fases de entrada posibles, por tanto, para cada di-bits de 2 bits introducidos al modulador, ocurre un solo cambio de salida, así que la razón de cambio en la salida es la mitad de la razón de bits de entrada.

2.6 Transmisión

Presentaremos un diagrama de bloques de un modulador de QPSK, dos bits (un di-bit) se introduce al derivador de bits, después que ambos bits han sido introducidos en forma serial, salen simultáneamente en forma paralela, un bit se dirige al canal I y el otro al canal Q, el bit I modula una portadora que está en fase con el oscilador de referencia (de ahí el nombre de I para el canal en fase), y el bit Q modula una portadora que está 90° fuera de fase o en cuadratura con la portadora de referencia (de ahí el nombre de Q para el canal en cuadratura).

En la Fig.2.25, se muestra un esquema de un modulador el tipo QPSK.

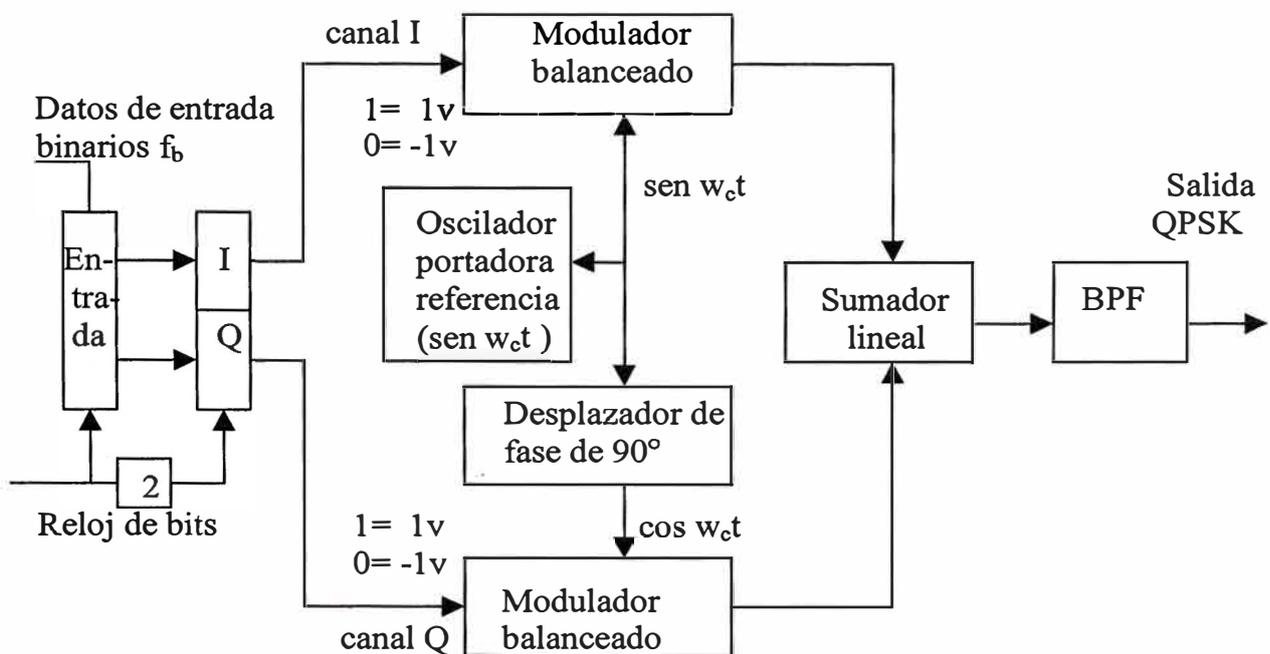


Fig.2.25. Esquema de un modulador QPSK.

Puede verse que una vez que un di-bit ha sido derivado en los canales I y Q, la operación es igual que en un modulador de BPSK, en esencia, un modulador de QPSK, son dos moduladores de BPSK combinados en paralelo y desplazados 90° .

Puede verse que, con QPSK, cada una de las cuatro posibles fases de salida tiene, exactamente, la misma amplitud, en consecuencia, la información binaria tiene que ser codificada por completo en la fase de la señal de salida.

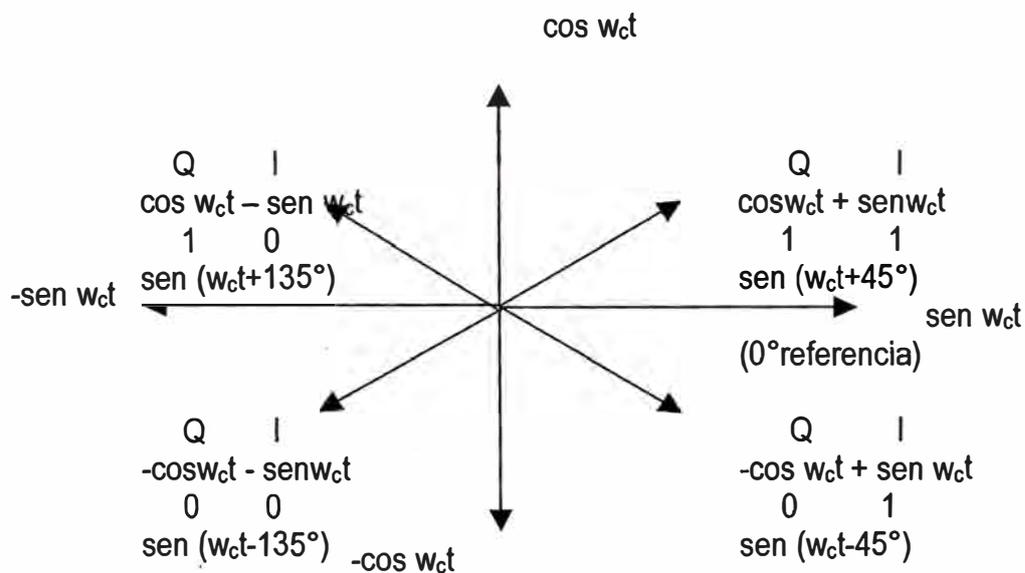


Fig.2.26. Diagrama de fase para QPSK.

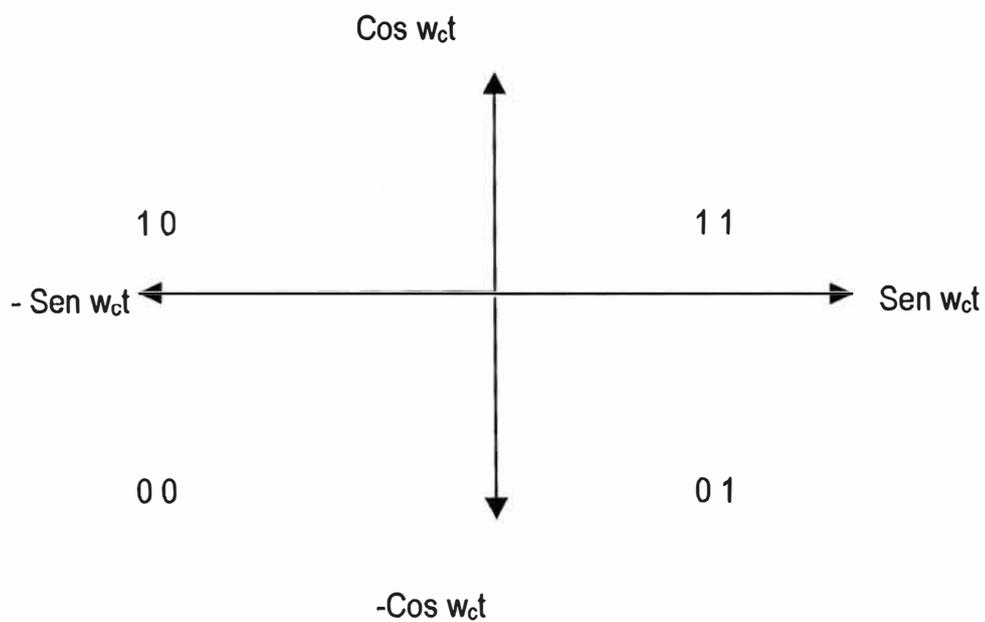


Fig.2.27. Diagrama de estados para QPSK.

Entrada binaria		Fase de Salida QPSK
Q	I	
0	0	-135°
0	1	-45°
1	0	$+135^\circ$
1	1	$+45^\circ$

ver TABLA N° 2.4

2.6.1 Consideraciones de ancho de banda para la transmisión QPSK

Con QPSK, ya que los datos de entrada se dividen en dos canales, la tasa de bits en el canal I o en el canal Q, es igual a la mitad de la tasa de datos de entrada $f_b / 2$, en consecuencia, la frecuencia fundamental más alta presente en la entrada de datos al modulador balanceado I o Q, es igual a un cuarto de la tasa de datos de entrada (la mitad de $f_b/2$: $f_b/4$), como resultado de los moduladores balanceados I y Q, requiere de un mínimo ancho de banda igual a la mitad de la tasa de bits que están entrando.

$$f_N = 2 (f_b / 4) = f_b / 2 \quad (2.12)$$

La entrada deberá ser entonces 4 veces menor que la frecuencia del reloj principal.

Por esta razón, el filtro de entrada tiene que ser 4 veces la frecuencia fundamental y el reloj recuperado debe ser dividido entre cuatro.

La frecuencia fundamental más alta en los canales de entrada son $1/8$ de la tasa de bits de salida, debido a que un sólo ciclo en los canales de entrada toman la misma cantidad de tiempo que 8 bits de salida, de esta manera obtenemos las señales $\sin w_c t$ y $\cos w_c t$ originales.

Por tanto con QPSK, se realiza una compresión de ancho de banda.

CAPÍTULO III

ETAPA RECEPTORA

3.1 Receptor

El receptor es aquella etapa que recibe la señal del transmisor afectada por ruido, perturbaciones y/o interferencias, el encargado de devolver la señal original es la etapa receptora propiamente dicha.

3.2 Recepción

3.2.1 Receptor QPSK

Presentamos un diagrama de bloques de un receptor QPSK, como el de la Fig.3.1, el derivador de potencia dirige la señal QPSK de entrada a los detectores de producto I y Q, y al circuito de recuperación de la portadora, el circuito de recuperación de la portadora reproduce la señal original del modulador de la portadora de transmisión, la portadora recuperada tiene que ser coherente, en frecuencia y en fase, con la portadora de referencia transmisora, la señal QPSK se demodula en los detectores de producto I y Q, que generan los bits de datos I y Q originales, las salidas de los detectores de productos alimentas al circuito para combinar bits, donde se convierten de canales de datos I y Q paralelos a un solo flujo de datos de salida binarios.

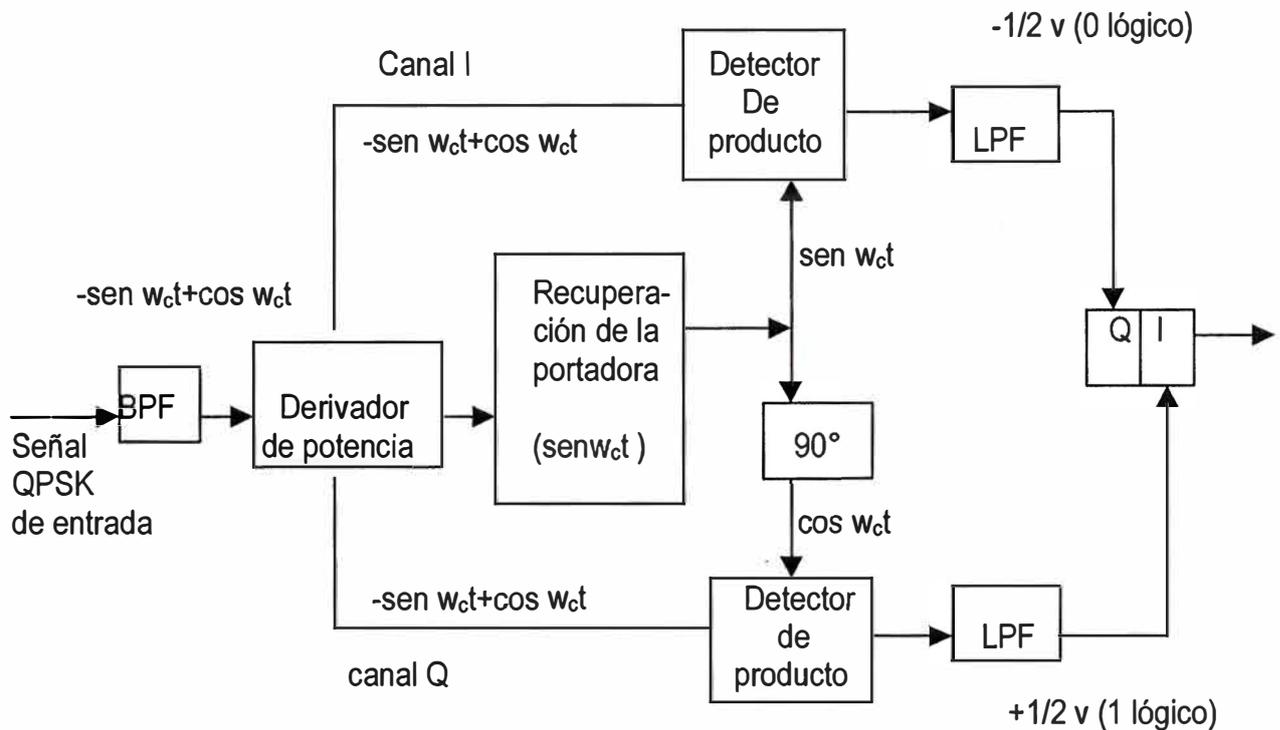


Fig. 3.1. Esquema de un demodulador QPSK.

3.3 Demodulación

Habíamos dicho que el receptor es el encargado de devolver la señal original, a este proceso se le conoce como demodulación, la demodulación discrimina la señal de nuestro interés de la portadora, tal como el esquema mostrada anteriormente.

3.4 Decodificador de Canal

El proceso de codificación de canal, consiste en buscar un camino en el diagrama de Trellis o en el árbol del código, que nos dé la secuencia de bits más probable, en el caso de no haber errores obtendremos la secuencia exacta.

El codificador convolucional añade una estructura a la secuencia de bits, incluso aunque la entrada sea totalmente aleatoria, se fuerza a que la salida del codificador de canal siga una determinada secuencia, esta restricción es la que da la capacidad de corregir errores a los códigos convolucionales.

El proceso de decodificación es equivalente a comparar la secuencia recibida con todas las posibles secuencias que pueden obtenerse con el correspondiente codificador y seleccionando la secuencia que está más próxima a la secuencia recibida.

Para realizar la decodificación se utiliza un algoritmo denominado Algoritmo de Viterbi, el fundamento de este algoritmo está en que no se almacenan todas las secuencias a las que da lugar el codificador, se basa en el principio del camino más óptimo, es decir el mejor camino o menor distancia de Hamming, a través del diagrama de Trellis que pasa por un determinado nodo, necesariamente incluye el mejor camino desde el principio del diagrama de Trellis hasta este nodo.

El principio anterior implica que para cada uno de los nodos del diagrama de Trellis sólo es necesario guardar el mejor camino o secuencia hasta este nodo, de esta forma, se tendrá caminos como estados diferentes, recordar que el numero estados $2^{(m-1)*k}$.

3.4.1 Descripción del Algoritmo de Viterbi

Paso 1

En un nivel (J), calcular la distancia de Hamming de cada camino entrante de cada nodo o estado, desde el nodo del nivel (J-1) hasta el nodo del nivel (J) a través del camino superviviente.

Paso 2

Para cada nodo o estado del diagrama de Trellis en el nivel (J), descartar todos los caminos que entran en el nodo, excepto el de distancia mínima, cuando a un nodo llegan dos caminos con la misma distancia se toma el superior.

Paso 3

Pasar al nivel (J+1) y repetir los pasos 1 y 2.

Los pasos descritos anteriormente, se aplican para J mayor o igual a 2, hasta ese valor se expanden los caminos.

Ilustramos con el siguiente ejemplo, supongamos que el codificador envía la secuencia **11 01 10 11 10 00 11** (codificador a 2,1,3) que corresponde a la codificación de la secuencia **1 0 0 1 1 1 0**, el receptor recibe la secuencia **11 01 00 11 11 00 11**, notamos que según nuestro ejemplo se han producido dos errores en las posiciones 5 y 10 respectivamente contados de izquierda a derecha en la última secuencia.

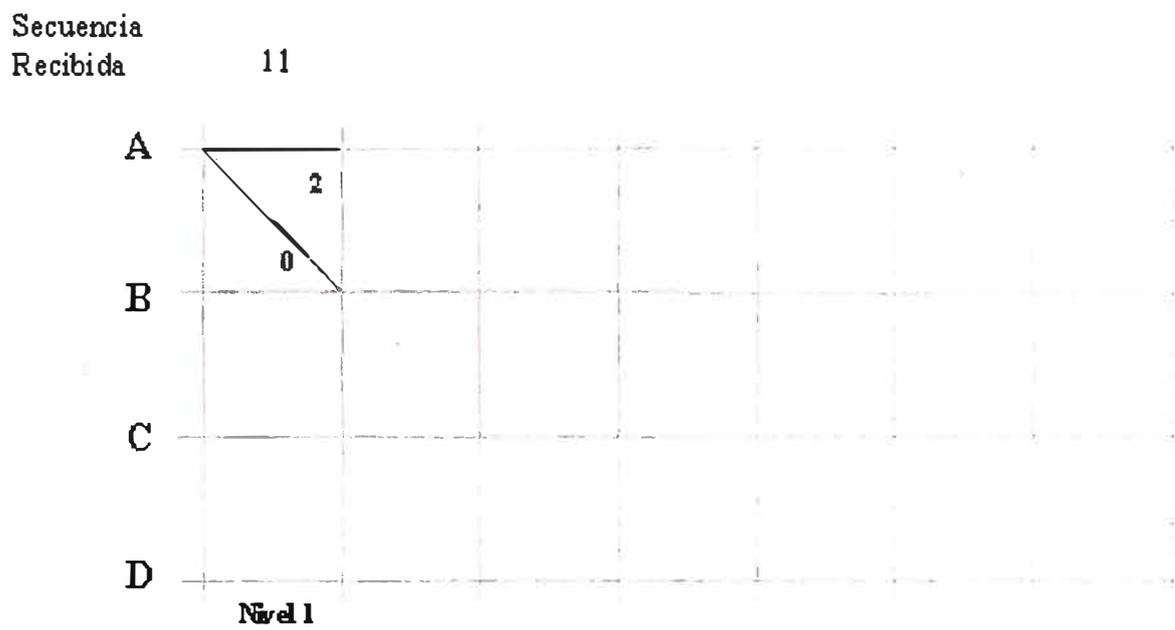
Paso 1

Fig.3.2. Construcción del diagrama de decodificación, paso 1, referencia [5].

$$d(11,00) = 2, d(11,11) = 0$$

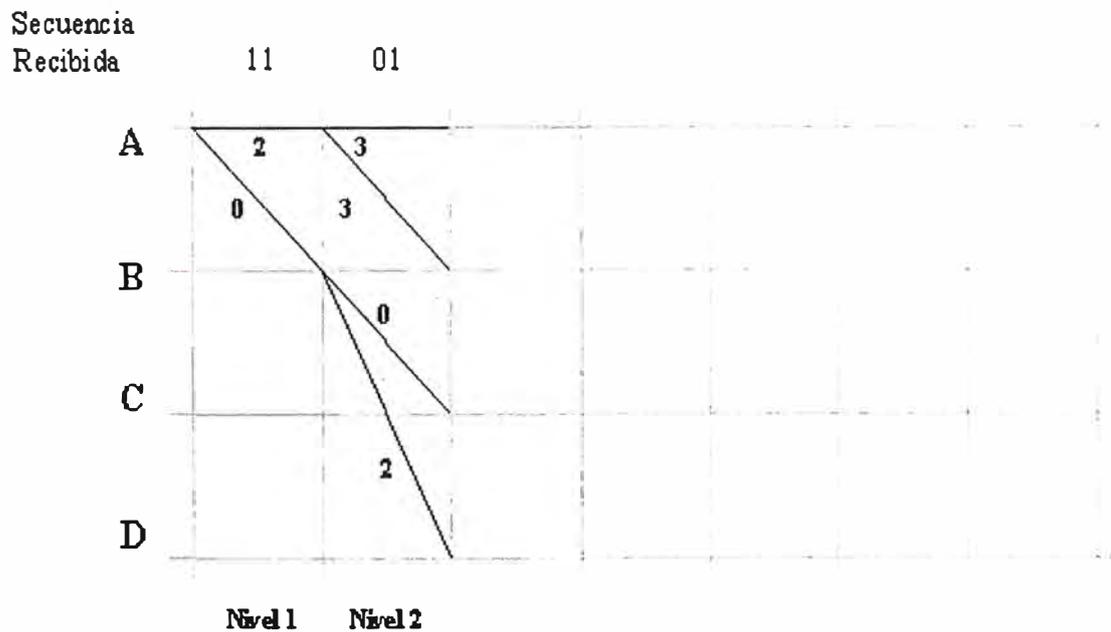
Paso 2

Fig.3.3. Construcción del diagrama de decodificación, paso 2, referencia [5].

$$2 + d(01,00) = 2 + 1 = 3, \quad 0 + d(01,01) = 0 + 0 = 0$$

$$2 + d(01,11) = 2 + 1 = 3, \quad 0 + d(01,10) = 0 + 2 = 2$$

En este paso nos encontramos en el nivel 2, a partir de ahora comenzamos a aplicar el algoritmo, vemos que cada estado del nivel 2 llega un único camino, por lo tanto nos quedamos los caminos por el momento.

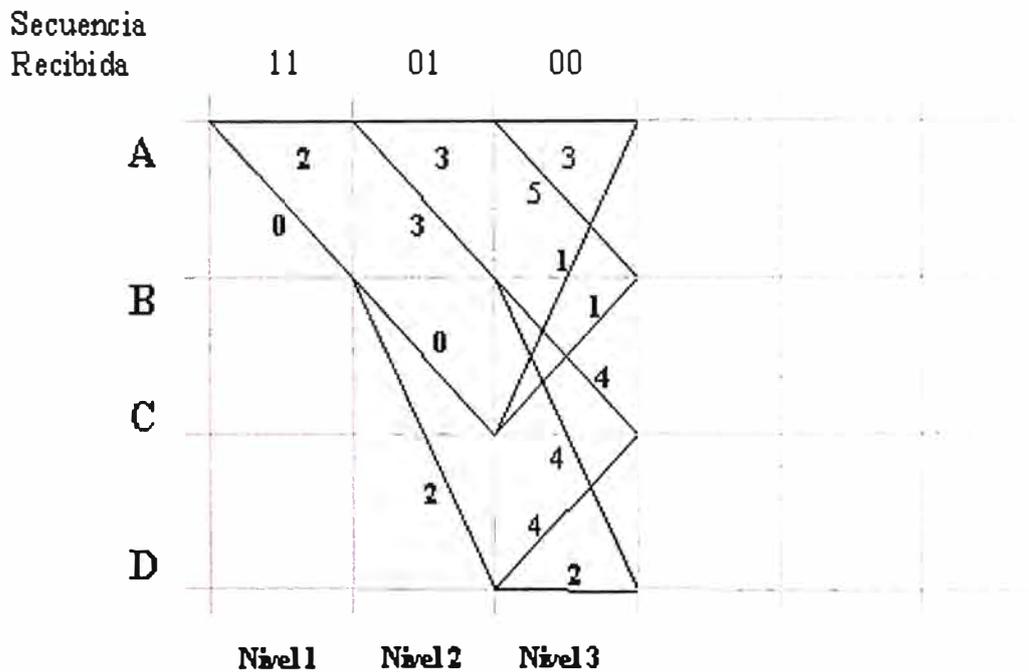
Paso 3

Fig.3.4. Construcción del diagrama de decodificación, paso 3, referencia [5].

$$3 + d(00,00) = 3 + 0 = 3$$

$$0 + d(00,10) = 0 + 1 = 1$$

$$3 + d(00,11) = 3 + 2 = 5$$

Para cada estado del nivel 3 nos quedamos con el camino de menor peso que llegue a él, los caminos que hemos seleccionado hasta el momento deben corresponder a la ruta más óptima.

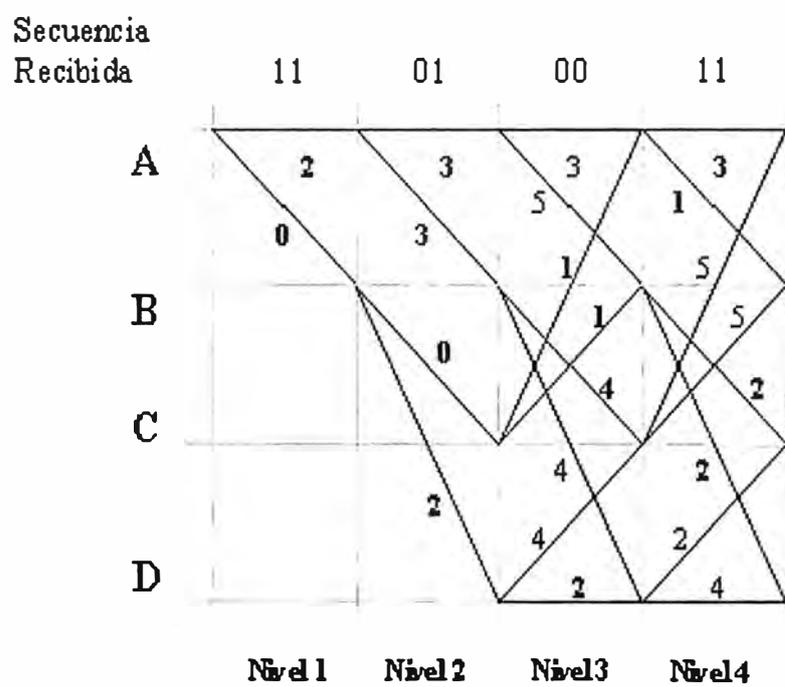
Paso 4

Fig.3.5. Construcción del diagrama de decodificación, paso 4, referencia [5].

Paso 5

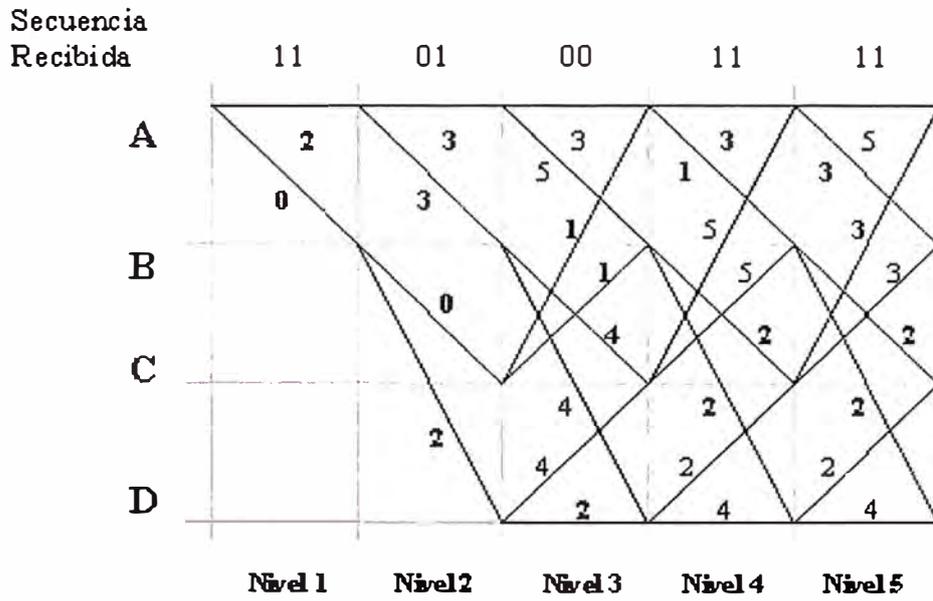


Fig.3.6. Construcción del diagrama de decodificación, paso 5, referencia [5].

Paso 6

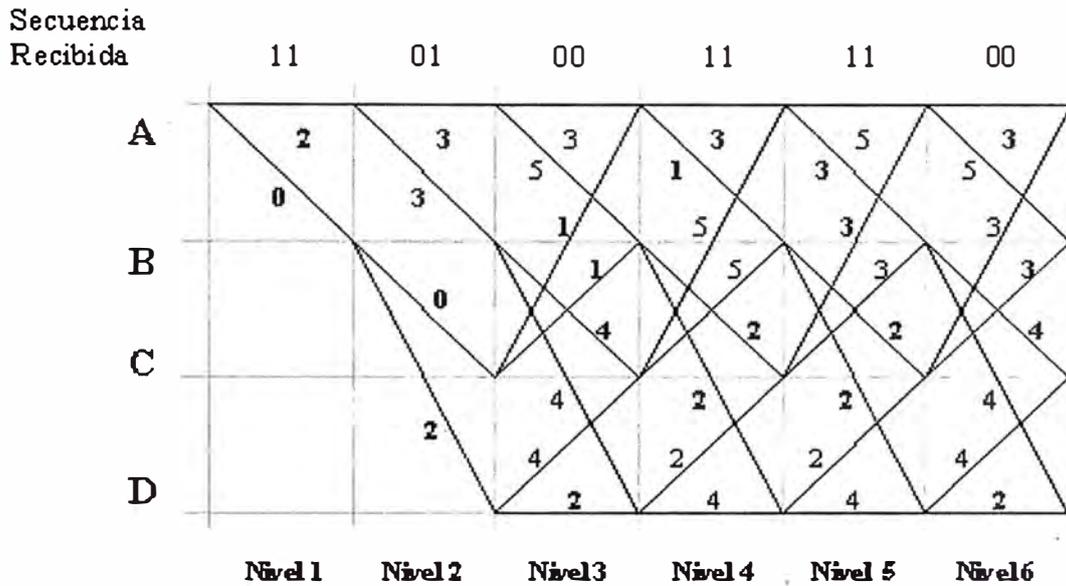


Fig.3.7. Construcción del diagrama de decodificación, paso 6, referencia [5].

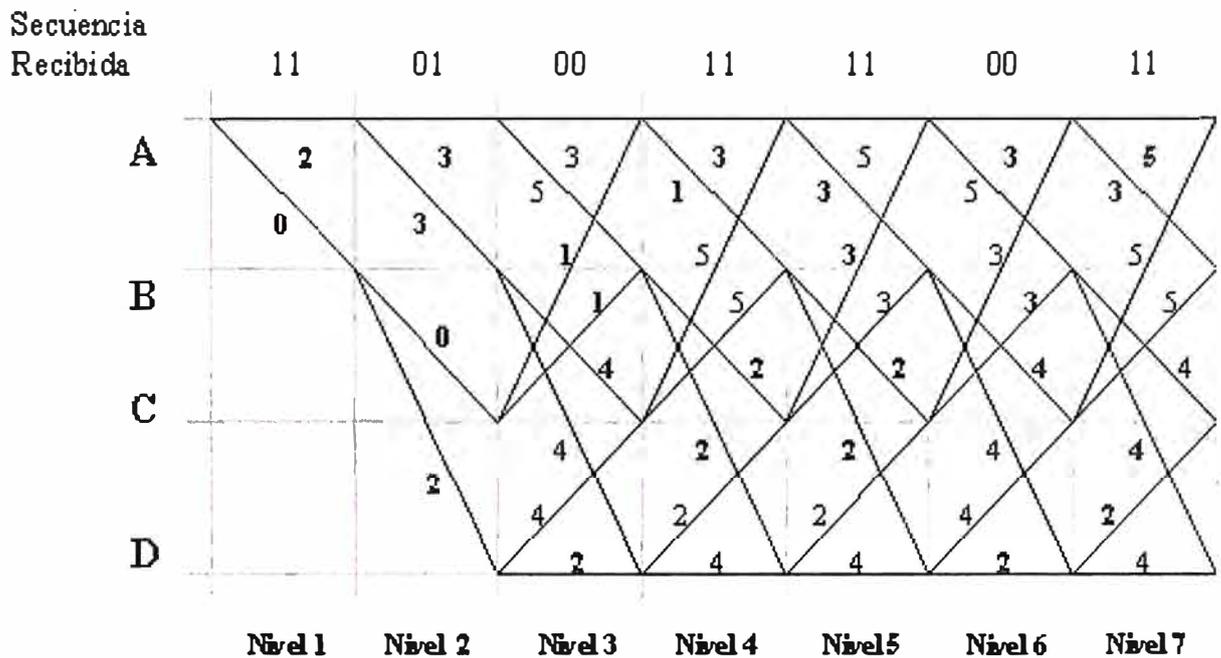
Paso 7

Fig.3.8. Construcción del diagrama de decodificación, paso 7, referencia [5].

Una vez llegado al final, escogemos el camino que nos da la distancia más corta en el último nivel, una vez seleccionado el camino, elegimos el bit que determina la transición de estado entre dos niveles comenzando desde el primer nivel hasta el último, la secuencia de bits obtenida es la secuencia decodificada.

Según el ejemplo, tenemos que la distancia más corta en el último nivel es 2 y viene dado por la Fig.3.9.

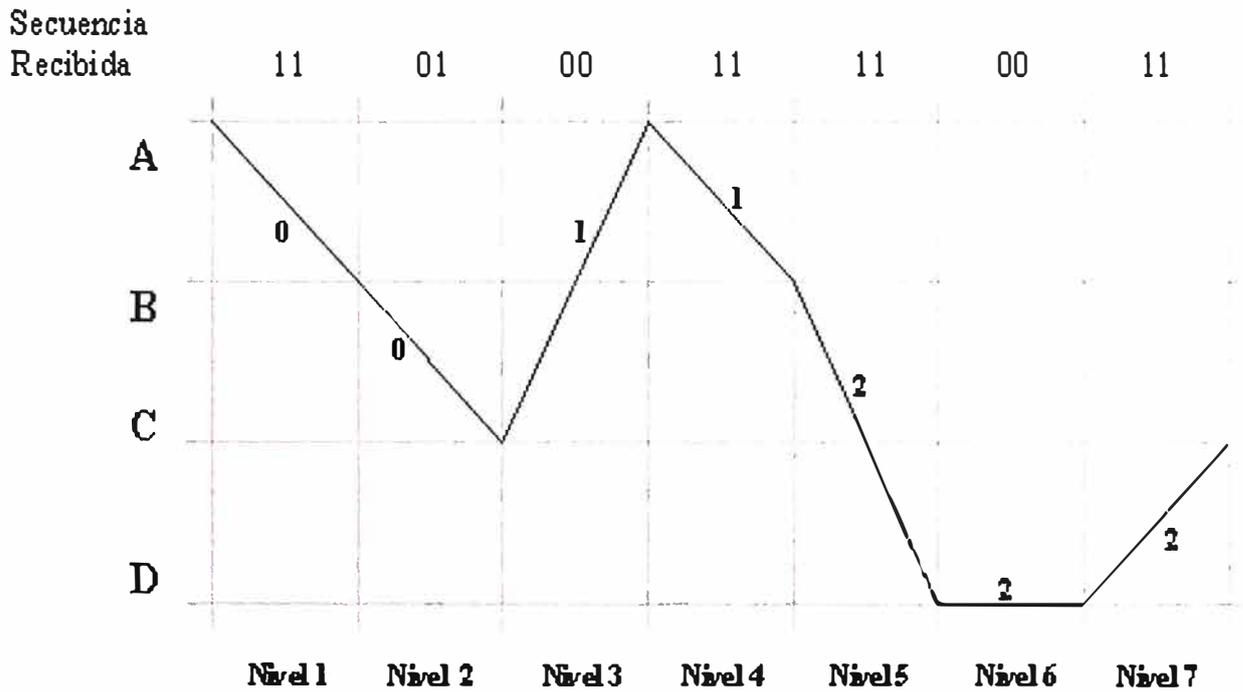


Fig.3.9. Seleccionamos el camino de menor peso, referencia [5].

Ahora seleccionamos en cada nivel el bit de entrada que nos determina la transición de estados que se reflejan según el camino obtenido, ver TABLA N° 3.1.

Nivel	Bit
1	1
2	0
3	0
4	1
5	1
6	1
7	0

ver TABLA N° 3.1

Por tanto, la secuencia decodificada obtenida es **1 0 0 1 1 1 0**, vemos que coincide con la secuencia codificada por el codificador y enviada al decodificador, el código utilizado ha sido capaz de detectar y corregir dos errores.

3.5 Decodificador de Línea

Consiste en realizar un mapeo inverso a la codificación de línea, es decir realizar una correspondencia entre niveles de voltaje a un valor lógico predeterminado, devolviendo la señal discreta.

3.5.1 Decodificador

El decodificador convierte el flujo de bits procesados en una señal discreta con valores de señal cuantificados.

3.5.2 Circuito retenedor de orden cero

Este dispositivo retenedor de orden cero, reconstruye una aproximación escalonada de la señal discreta.

3.5.3 Filtro análogo posterior

Es llamado también filtro análogo sub secuento o filtro anti-imagen, extrae el periodo central del espectro periódico y elimina las réplicas no deseadas o imágenes, lo que produce una señal análoga suave reconstruida.

CAPÍTULO IV

CANAL DE COMUNICACIÓN Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN DIGITAL

4.1 Introducción

Un medio físico se convierte en un canal de comunicación cuando se le acopla un transmisor en un extremo, un receptor en el otro y, si es necesario para evitar el excesivo deterioro de la señal transmitida, unos repetidores intermedios, el concepto de canal de comunicación, tiene asociado un sentido de transmisión (es unidireccional), el medio si embargo, no suele excluir la existencia de ambos sentidos, tratándolo adecuadamente pueden coexistir dos o más canales sobre un mismo medio físico, en este capítulo, se ilustraran los fenómenos que posibilitan la transmisión de la señal desde una estación emisora, hasta una estación receptora.

4.2 Análisis de Fourier

Mediante el análisis de Fourier, sabemos que una función $g(t)$ periódica de periodo T y continua en el tiempo, puede representarse como una suma de un número teóricamente infinitos de senos y cosenos, con frecuencia $f = 1 / T$.

Para cada valor de n ($n = 1, 2, 3, \dots$), obtenemos un armónico de la señal, siendo el armónico fundamental o principal, el que corresponde al valor de $n = 1$ y frecuencia f .

La frecuencia del resto de armónicos es siempre múltiplo de la frecuencia principal (nf), si asignamos a A_n como el coeficiente de las funciones senos y a B_n como el coeficiente de las funciones cosenos, entonces para un valor de n determinado, los coeficientes de A_n y B_n , corresponden a las amplitudes de dichas funciones en el n -ésimo armónico, a estos coeficientes se les conoce como coeficientes de Fourier.

Por lo tanto, se descompone la señal $f(t)$ en una suma de una serie infinita de armónicos (serie de Fourier) de forma que cuando mayor sea n , más cercanos estaremos de la señal original, por lo general en la mayoría de casos encontramos en el mundo real, que los coeficientes de Fourier A_n y B_n decaen rápidamente al aumentar n , por tanto nos bastará un número reducido de armónicos para que la señal sea reconocible perfectamente.

Para poder comprender el concepto de ancho de banda de un canal de comunicación, es necesario tener en cuenta que una señal, se va a poder descomponer para transmitirla en una serie de armónicos (funciones senos y cosenos) con frecuencias distintas y todas estas son múltiplos de la frecuencia principal f .

4.3 Ancho de banda de un canal de comunicación

Cuando transmitimos una señal por un canal de comunicación, esta sufre una pérdida de energía y las amplitudes de cada uno de sus armónicos disminuyen, si todos los coeficientes del desarrollo de Fourier (A_n y B_n) fueran disminuidos igualmente, la señal estaría disminuida en amplitud, pero no distorsionada, la señal estaría atenuada.

Lo que ocurre en la realidad es que cada medio de transmisión posee una respuesta en frecuencias característica, de forma que la señal que se transmite por él sufre distintas atenuaciones en función de la frecuencia, un medio determinado tendrá solamente un rango de frecuencias, entre las cuales, cualquier señal con una frecuencia comprendida dentro de este rango que se transmita por él, sufrirá la misma atenuación en los armónicos que se encuentren dentro del rango de frecuencias del canal.

Llamaremos ancho de banda de un canal, al rango de frecuencias entre las cuales los armónicos sufren la misma atenuación durante la transmisión, de forma que se puede aplicar la misma escala de amplificación para ese rango de frecuencias sin que se produzca distorsión, el ancho de banda sería la diferencia entre la frecuencia superior e inferior que se puede transmitir con atenuación pero sin distorsión por un medio físico empleado como canal de comunicación.

El ancho de banda de un canal no solamente está limitado por el medio de transmisión, sino también por los dispositivos conectados a él, la respuesta en

frecuencias del medio no es la única causa de distorsión de una señal, pueden influir otros factores.

Ningún canal de comunicación, puede transportar señales sin causar pérdidas de energía en la señal a transportar, cada armónico de la señal tiene asociado un valor de energía dado por $D_n = (A_n + B_n)^2$, este valor es de especial interés, ya que es proporcional a la energía transmitida a la frecuencia o armónico correspondiente, proporciona una medida de la energía de la señal que corresponde al n-ésimo armónico.

Por tanto el medio, dependiendo de su respuesta en frecuencia característica, va a atenuar en forma desiguales las amplitudes de los diferentes armónicos de la señal transportada, dando lugar a que la pérdida de energía no sea proporcional para cada armónico, por ello la señal se va a distorsionar, en general las amplitudes se transmiten sin degradación (es decir, con un mismo factor de atenuación) para un rango de frecuencias que suelen ser de $f = 0$ hasta $f = f_c$, siendo f_c la frecuencia de corte característica del medio, medida en ciclos/segundos o en Hertzios (Hz), todas las frecuencias superiores a dicha frecuencia de corte sufren atenuaciones, este rango de frecuencias es lo que hemos denominado como ancho de banda, es una propiedad del medio de transmisión, es posible limitar al ancho de banda de un medio colocando filtros que disminuyan el rango de frecuencias que puede transportar, pero no es posible ampliarlo, ya que depende intrínsecamente de las propiedades físicas del medio.

Tal como hemos definido el concepto de ancho de banda de un medio, definiremos el ancho de banda de la señal que va a ser transmitida por dicho medio, también se le denomina ancho del espectro de la señal, se define como la banda de frecuencias que contiene la mayor parte de la energía de la señal, se considera despreciable la energía contenida en las frecuencias fuera de este margen, un criterio a seguir sería considerar aquella banda de frecuencias que transportan un 90% de la energía total de la señal.

4.4 Velocidad de transmisión

Sin pérdida de generalidad, supones que la transmisión se realiza a través de un tipo de cable eléctrico, por consiguiente, la señal de información puede ser transmitida por un cable variando alguna propiedad de la corriente eléctrica que circula por él, como por ejemplo el voltaje, al ser de nuestro interés transmitir información digital, tendríamos que representar los estados lógicos 0 y 1 de una forma sencilla y fácil de reconocer, un convenio sería emplear un nivel de tensión de 0 voltios para representar el estado lógico de 0, y 5 voltios para representar el estado lógico 1.

Se considera estados significativos de una línea a todos aquellos niveles de tensión que representan información distinta, si disponemos de dos niveles de tensión para representar la información, entonces sólo podemos señalar un bit en cada estado, si utilizamos cuatro niveles de tensión, podemos agrupar la información a transmitir de modo que cada nivel de tensión represente dos bits, en este caso se pueden transmitir dos bits de información por cada intervalo significativo de tiempo.

Con lo anterior, definimos la velocidad de modulación como el número de veces por segundo que la señal cambia de valor en la línea o canal de comunicación, esta velocidad se mide en baudios, el número de baudios determina la cantidad de cambios de estado por segundos que se producen en una transmisión, cuando más estados, más cantidad de bits por segundos se podrán transmitir, la expresión matemática que define la velocidad de modulación vendría dada por:

$$V_M = 1/T \quad (4.1)$$

Siendo T el intervalo de tiempo consumido por un estado.

Entonces un cambio de estado puede implicar la transmisión de más de un bit de información, por lo tanto, el concepto de baudio esta ligado directamente a las características del medio de transmisión y corresponde a la cantidad de veces que la señal portadora oscila (cambio de estado) por unidad de tiempo.

Definimos la velocidad de transmisión como el número de bits transmitidos por segundos, su unidad es el bps (bits por segundo), en general si el número de estados posibles de la línea de comunicación es n, a cada estado le corresponderán $\log_2 n$ bits de información, por lo tanto la velocidad de transmisión será:

$$V_T = 1/T * (\log_2 n) = V_M * (\log_2 n) \quad (4.2)$$

Solo en el caso de tener dos estados significativos ($n = 2$), el número de baudios coincidirá con la cantidad de bits por segundos que se pueden transmitir por la línea.

El tiempo necesario para transmitir un carácter depende del método de codificación y de la velocidad de transmisión, si por ejemplo tenemos caracteres codificados con 8 bits, vamos a emplear dos estados significativos y que la velocidad de transmisión es V bps, el tiempo necesario para enviar el carácter sería:

$$T_{\text{CARÁCTER}} = 8 * T_{\text{BIT}} = 8 * T * (\log_2 n) = 8 * T = 8 * (1/V) \quad (4.3)$$

En la transmisión de un conjunto de caracteres se puede considerar que el carácter va a repetirse indefinidamente a partir del último bit, por lo tanto el tiempo $t_{\text{carácter}}$ podría concebirse como el periodo de la señal, en tal caso la frecuencia del primer armónico de la serie de Fourier será:

$$F = 1 * (T_{\text{CARÁCTER}}) = V * (1/8) \quad (4.4)$$

Si para enviar la señal se emplea como medio físico de transmisión, por ejemplo, una línea telefónica común, cuyo ancho de banda es aproximadamente 3 KHz, limitaremos las frecuencias más alta que pueden pasar a través del medio, de modo que la frecuencia del último armónico que podrá transmitirse sin distorsión será menor o igual a 3000 Hz. $f_N < 3000$ Hz.

Como la frecuencia del N-ésimo armónico es N veces la frecuencia del primer armónico: $f_N = N * f_1$.

Podemos deducir que el número máximo de armónicos que se podrá transmitir por el medio físico vendrá dado por la expresión:

$$N = (f_N / f_1) < ((3000 * 8) / V) = 2400 / V \quad (4.5)$$

En general, la cantidad de armónicos N para una velocidad de transmisión V y un ancho de banda de 3 KHz., corresponde a la parte entera de la expresión anterior, se puede deducir de dicha expresión que si se aumenta la velocidad de transmisión se reduce el número de armónicos que pueden pasar a través del canal sin distorsión, para el ancho de banda que presenta el medio físico utilizado en la red telefónica, si queremos obtener velocidades de transmisión superiores a 2400 bps es necesario recurrir a sistemas con varios estados, utilizando para ello varios niveles de voltaje.

En la transmisión de información digital entre computadoras es fundamental que aseguremos intercambios de datos libres de errores, el costo de esto estriba en que a la propia información a transmitir se le debe añadir otras informaciones adicionales para la detección / corrección de errores, para establecer y controlar la comunicación, etc., aparece aquí un nuevo concepto de velocidad que llamaremos velocidad de transferencia de datos y que representa la cantidad de información útil que puede transmitirse por unidad de tiempo, esto es, sería el cociente de el número de bits de información útil entre el tiempo para transmitir todos los bits.

4.5 Capacidad de un canal de comunicación (Teorema de Nyquist)

La capacidad de un canal de comunicación, es la velocidad a la que pueden ser transmitidos los datos por dicho medio físico, y depende de los siguientes factores:

- Velocidad de transmisión.
- Ancho de banda de la señal.
- Nivel medio de ruido.
- Tasa de errores.

Existen hechos relevantes que determinan la capacidad de todo canal de comunicación, los cuáles mencionamos a continuación:

- Un aumento de la velocidad de transmisión aumentará la tasa de errores, es decir aumenta la razón de errores por bit.
- Un aumento en la relación señal a ruido SNR reduce la tasa de errores por bit.
- Un incremento en el ancho de banda permite un aumento en la velocidad de transmisión.

Nyquist elaboró una serie de teorías sobre el muestreo de señales, demostrando que si se hace pasar una señal por un canal de ancho de banda W , dicha señal puede reconstruirse si se toman muestras de las misma con una frecuencia igual a dos veces le frecuencia del ancho de banda por segundo, es decir a $2W$, muestrear a una frecuencia superior no tiene sentido, ya que las frecuencias más altas que el ancho de banda no pueden ser recuperadas por haber sido filtradas, esto constituye el primer criterio de Nyquist, según el cual la velocidad máxima a la que se puede transmitir

una señal a través de un canal de ancho de banda W , y para una señal de n niveles discretos viene dada por la expresión:

$$C = V_{MAX} = 2 * W (\log_2 n) \quad (4.6)$$

La cual define la capacidad de transferencia de un canal, por ejemplo, para el canal telefónico, si consideramos un caso ideal sin ruido y con un ancho de banda de 3KHz., según el teorema de Nyquist no se podría reconstruir señales binarias que se hubieran transmitidos por él a velocidades superiores a los 6000 bps.

La expresión anterior determina la velocidad máxima a la que se puede transmitir por un canal ideal sin ruido, en la práctica no existen canales libres de ruido y otras imperfecciones, por lo que esta velocidad máxima se verá notablemente reducida, de la expresión también se podría deducir que se puede ampliar la capacidad de un canal indefinidamente aumentando el valor de n , esto tampoco es posible, ya que el número de estados de señalización está limitado por la potencia máxima de la señal, por la sensibilidad del receptor, etc.

Desde otro punto de vista, si el canal tiene un ancho de banda W , entonces el pulso más estrecho que se puede transmitir a través del canal tiene un ancho igual a $1/2 * W$ segundos, por lo tanto la velocidad máxima a la que se puede transmitir en el canal viene dada por la velocidad de Nyquist $V=2*W$, para el caso de que la señal sea multinivel, la velocidad sería $V = 2 * W * \log_2 M$, donde $M = n^2$ niveles.

Si no existiera ruido, la velocidad de transmisión se puede incrementar sin límite, cosa que no ocurre en casos reales ya que el ruido está presente en todo canal de comunicación y es un factor que limita la capacidad del canal.

Habíamos mencionado la relación señal a ruido SNR (signal-to-Noise Ratio), este valor mide la amplitud relativa entre la señal que se ha de transmitir y el ruido, se expresa normalmente en decibelios y es recomendable que esta sea lo más alta posible.

4.6 Teorema de Shannon

Considera la velocidad del canal dado por: $V = W \log_2(1+SNR)$. (4.7)

Como ejemplo, mencionaremos la capacidad de Shannon en un canal telefónico, si tenemos un canal telefónico con $W = 3,4\text{KHz}$, con una $SNR = 10000$ (40 dB), la capacidad del canal será: $V = 3\ 400 \log_2(1+10000) = 44.800\text{bps}$.

La relación SNR se expresa normalmente en dB, $10\log 10000$, $SNR = 40$ dB.

En la práctica se consiguen velocidades mucho menores ya que Shannon considera sólo ruido blanco y no otras perturbaciones y/o alteraciones en la transmisión tales como atenuación, distorsión e interferencia.

4.7 Banda Base y Banda Ancha

En los estudios espectrales de la señal impulso rectangular se demuestra que si la duración del impulso se reduce, el ancho espectral de la señal aumenta y viceversa, así, los impulso cortos tienen un amplio espectro, mientras que los impulsos largos tienen un espectro más estrecho, aunque el impulso sea una señal teórica sirve para representar lo que sucede con las señales digitales, las señales digitales se pueden concebir como trenes de impulsos irregulares (no podemos saber a priori cuando se va a generar un impulso), si queremos aumentar la velocidad de transmisión del tren ello conlleva reducir la amplitud de los impulsos, lo cual implica un aumento en el espectro de frecuencia de la señal, por lo que será necesario un canal con mayor ancho de banda para su transmisión.

Por lo tanto, el hecho de que en una señal digital se produzca transiciones bruscas, obliga al empleo de medios de transmisión con elevados anchos de banda, para evitar la distorsión de la señal, lógicamente la distorsión será mayor conforme se aumente la velocidad de transmisión, hay que tener en cuenta que un canal actúa como un filtro pasa bajo.

Si la transmisión se produce para velocidades bajas y distancias cortas, la distorsión de la señal es lo suficientemente débil como para que pueda ser reconocida en el otro extremo, en tales condiciones, las señales digitales pueden ser transmitidas directamente al medio sin necesidad de ningún tipo de actuación sobre las mismas, a este tipo de transmisión se denomina en Banda Base.

Por lo general las redes de área local utilizan el modo de transmisión en Banda Base, las señales se transmiten de modo digital sin modular, lo cual tiene el inconveniente de que la distancia máxima entre terminales de la red no puede exceder a los dos o tres mil metros.

En la modalidad de transmisión de Banda Ancha se consigue alcanzar distancias de hasta 40 o 50 Km., para ello es necesario cambiar la forma física de la información mediante el proceso de modulación, se cambia la forma física de la información de impulsos digitales a ondas moduladas.

Decimos que una señal a la que se llama portadora, está modulada por otra, cuando la segunda controla algún parámetro de la primera, el ejemplo más típico es la modulación de amplitud de un senoide por otra de frecuencia menor.

El empleo de una señal portadora radica en el hecho de que la portadora requiere un menor ancho de banda que la señal digital original para llevar a cabo su transmisión a lo largo del medio que constituye el canal de comunicación.

4.8 Imperfecciones en un canal de comunicación

4.8.1 Ruido

Es la energía no deseada proveniente de fuentes distintas al transmisor.

El movimiento al azar de los electrones en un cable (debido a que el electrón se encuentra a una temperatura diferente al cero absoluto) causa ruido térmico y esto es

inevitable, el acoplamiento inductivo entre dos cables que están cerca uno del otro causa diafonía (este hecho se observa cuando al hablar por teléfono, se puede oír otra conversación en el teléfono).

Existen otras fuentes de ruido como el Sol, las estrellas, las descargas atmosféricas, el ruido fabricado por el hombre, etc.

El ruido consiste en cualquier señal no deseada que interfiere con la reproducción fiel de una señal deseada en un sistema, en la mayoría de casos el ruido está presente en los medios o canales de transmisión, presenta las siguientes características:

- Es aleatorio, lo que significa que sólo es posible conocer su comportamiento de manera estadística.
- Afecta directamente las señales que están siendo transmitidas, de tal forma que pueden provocar que el mensaje original no pueda ser recuperado.
- Representa los distintos comportamientos que puede tener los medios de transmisión.

El ruido blanco, es la señal que presenta un mismo efecto perturbador de magnitud constante para todas las frecuencias, en la vida real lo encontramos como ruido térmico, el cual se encuentra presente en todo componente electrónico, la causa del ruido térmico es la agitación dependiente de la temperatura de los electrones dentro de la estructura de los conductores, su efecto es controlable.

4.8.2 Atenuación

Reduce el valor de la señal y puede hacerla tan pequeñas como el ruido, haciendo imposible su detección, se debe a la pérdida de energía conforme la señal se propaga hacia su destino, en los medios guiados por ejemplo, la señal decae en forma logarítmica con la distancia.

4.8.3 Distorsión

El medio de transmisión altera las características de la señal debido a que las componentes de Fourier de esta, viajan a distintas velocidades, dando como resultado a la salida del medio de transmisión, una señal no esperada o imperfecta.

4.8.4 Interferencia

Es la contaminación debida a señales externas de la misma naturaleza que el mensaje que queremos transmitir, por ejemplo cuando dos estaciones que transmiten con portadoras adyacentes y no poseen una adecuada separación entre ellas, se produce interferencia.

4.9 Simulación de un sistema de comunicación digital

Presentamos el gráfico que simulará un sistema de comunicación digital, el tema de nuestro interés es calcular el BER, ya que de acuerdo a lo explicado, define la calidad de un sistema de comunicación digital.

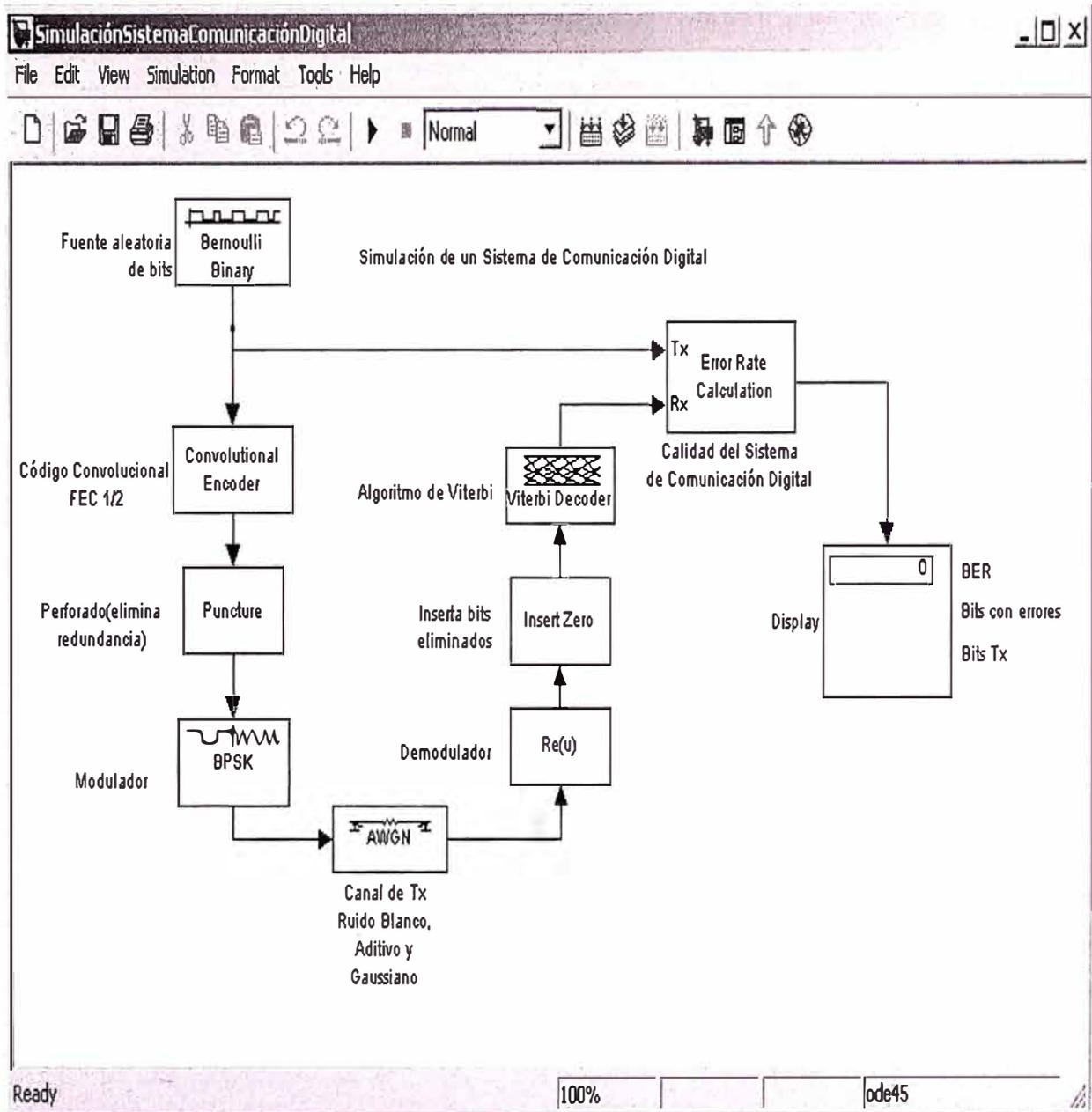


Fig. 4.1. Simulink – Matlab 6.5, el presente esquema calcula el BER, el cual define la calidad de cualquier sistema de comunicación digital.

4.9.1 Descripción de la simulación del sistema de comunicación digital

-El bloque Bernoulli Binary, genera en forma aleatoria bits que va a ser transmitidos, estos provienen de cualquier proceso de conversión análogo digital y en esencia, esta señal binaria es la que nos interesa para la simulación y para la calidad del sistema.

-Los parámetros que tiene son los siguientes: se setea a 0.5 la posibilidad que el software cree un 0 o 1 binario, se coloca como máximo una secuencia de 10^6 bits, el software generará un número de bits menor o igual a dicho valor, se cogen dichos bits a razón de 1 bit por segundo y se coloca a un valor 3 las muestras por trama, es decir 3 bits por trama ya que se considera una codificación convolucional con una secuencia compuesta por 3 registros de desplazamiento, la trama elegida de 3 bits por trama son las que van a entrar al codificador.

-Se coloca el codificador convolucional FEC $\frac{1}{2}$, es decir por cada bits de entrada el codificador genera 2 bits de salida, al tener como entrada la trama de 3 bits, codifica a 6 bits, los cuales llevan información del bit a codificar y de los dos anteriores a él.

-Luego del codificador convolucional, se agrega un bloque que elimina redundancia en los bits y realiza un mapeo de 6 bits a 4 bits, lleva un vector por defecto (110110), si la longitud del vector de entrada es menor que la longitud del vector por defecto, se repite el primer vector y se completa con los bits correspondientes para llegar a los 4 bits, el simulink realiza dicho mapeo, adicionalmente reduce el ancho de banda.

- Modulador BPSK, con fase inicial de 0° , llevando una muestra por símbolo.

-Se simula un canal de ruido blanco, aditivo y gaussiano, el ruido blanco es debido al ruido térmico, tiene un energía de bit frente al ruido expresada por E_s / N_0 y una potencia en la señal de entrada expresada en vatios, se fija a un periodo de símbolo inicialmente a 1 seg., la relación señal ruido viene expresado por SNR, es probaran con los valor mínimos permisibles, para poder demodular la señal.

-El bloque $\text{Re}(u)$, hace las veces de demodulador, el simulink introduce ruido complejo, por ello, este bloque toma y demodula entregando la parte real.

-Este bloque realiza el mapeo de 4 bits a 6 bits, usa como es lógico un vector idéntico ya que al restablecer los bits usa lógica con or-exclusivo, esto devuelve a los 6 bits que entran al decodificador, el cual mediante el algoritmo de Viterbi los regresa a los 3 bits de la trama inicial.

-Algoritmo de decodificación de 2 a 1, es decir por cada 2 bits de entrada el algoritmo devuelve 1 bits, para reducir la posibilidades de errores y corrección de los mismos.

-En este bloque se presenta la calidad del sistema de comunicación, que se relaciona a la claridad de la comunicación, ausencia de ruido y comodidad de comunicación, en sistemas análogos esta relacionado al error cuadrático medios entre la señal transmitida y la recibida, a la relación señal ruido y se evalúa mediante métodos cualitativos, en los que se da un valor referencial a audio o video recibido en el receptor, en sistemas digitales esta relacionada con la tasa de error, los cuales se

muestran en el display, los tres parámetros indican el BER, los bits con errores y la cantidad de bits transmitidos en orden descendente.

Simulación N° 1

Tabla de valores

SNR (dB)	60
Es / No (dB)	6

ver TABLA N° 4.1

Bits Tx	1E+006	
BER	7E-006	
Bits con errores	(Bits Tx) * BER	7

ver TABLA N° 4.2

La TABLA N° 4.1 muestra los valores usados en la simulación N° 1, los valores de la TABLA N° 4.2 son el resultado de la simulación respectiva, el esquema se presenta en la Fig. 4.2.

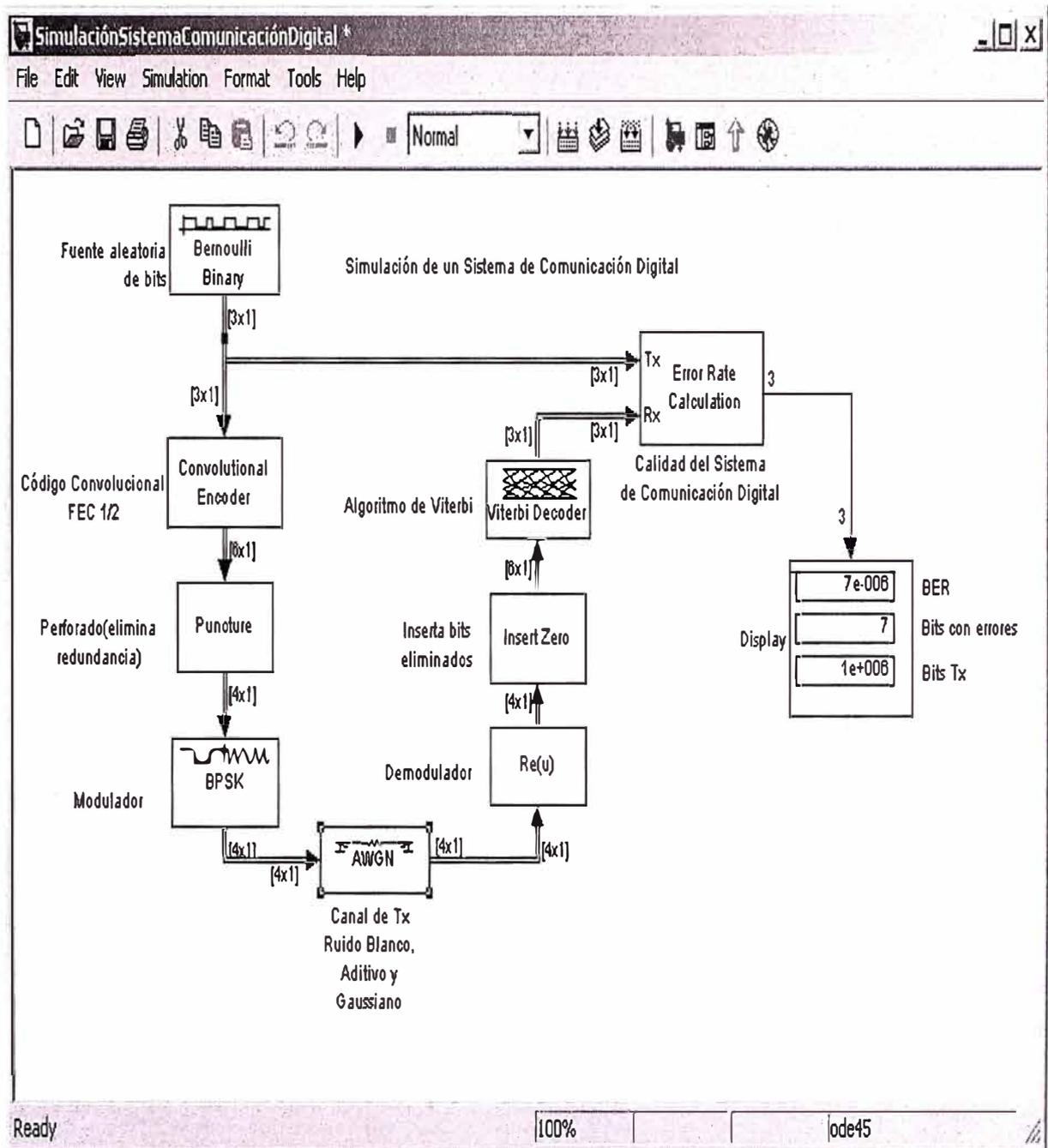


Fig. 4.2. Resultado de la simulación N° 1, tomando valores de la TABLA N° 4.1.

Observamos que dichos valores son los óptimos para una óptima calidad, comparable con sistemas de comunicaciones reales, los cuales usan un valor de SNR = 60 dB o superiores, cuanto mayor sea la relación señal a ruido será más fácil diferenciar o determinar con precisión los 1's y los 0's.

Simulación N° 2

Tabla de valores

SNR (dB)	50
Es / No (dB)	5

ver TABLA N° 4.3

Bits Tx	1E+006	
BER	3.7E-005	
Bits con errores	(Bits Tx) * BER	37

ver TABLA N° 4.4

La TABLA N° 4.3 muestra los valores usados en la simulación N° 2, los valores de la TABLA N° 4.4 son el resultado de la simulación respectiva, el esquema se presenta en la Fig. 4.3.

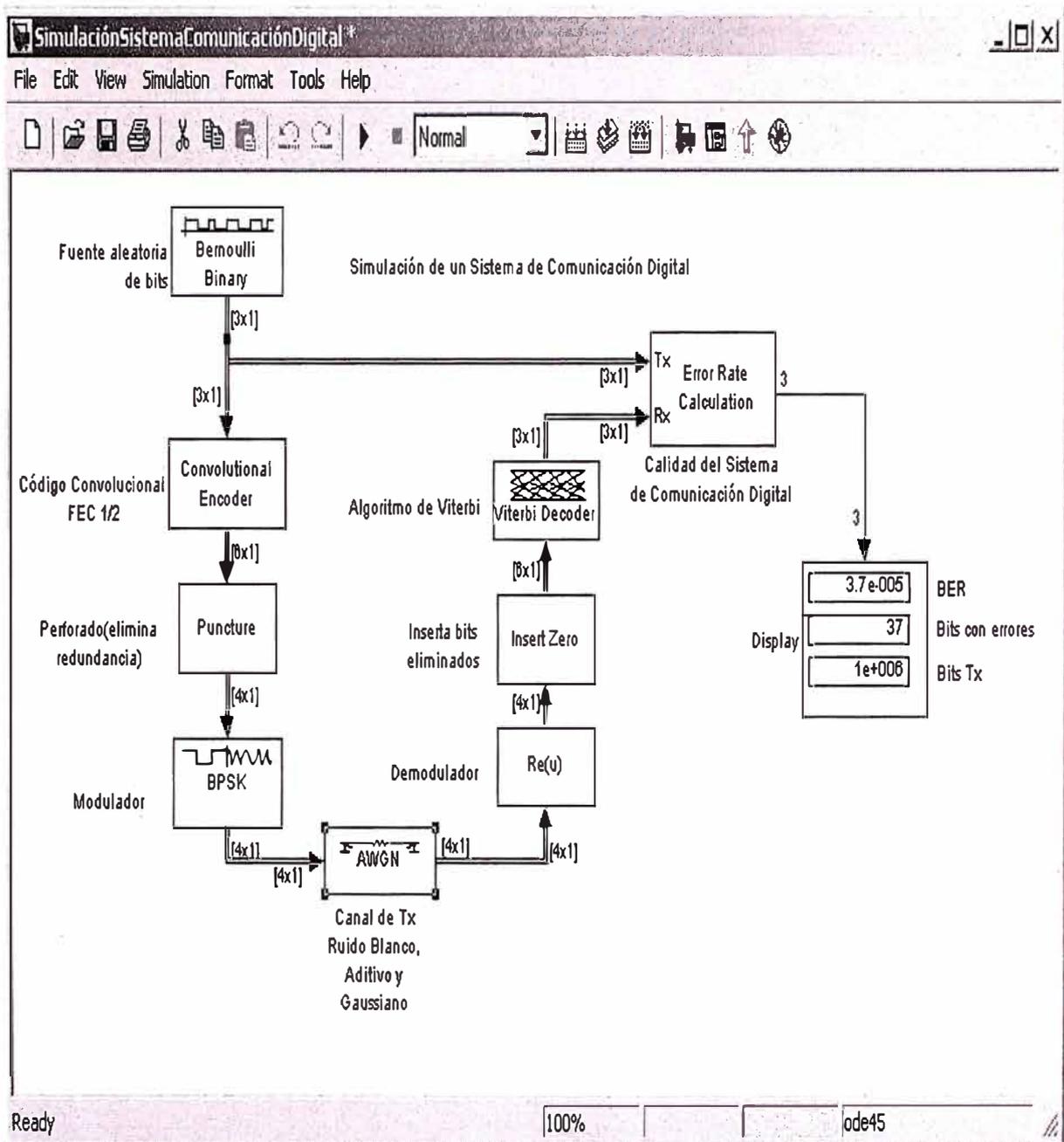


Fig. 4.3. Resultado de la simulación N° 2, tomando valores de la TABLA N° 4.3.

Se observa que el sistema de comunicación digital llega a tener 37 bits errados, equivale a tener una buena calidad en el sistema de comunicación digital, notando que una disminución de la SNR incide en un aumento de bits errados.

Simulación N° 3

Tabla de valores

SNR (dB)	40
Es / No (dB)	4

ver TABLA N° 4.5

Bits Tx	1.94E+005	
BER	0.0005259	
Bits con errores	(Bits Tx) * BER	102

ver TABLA N° 4.6

La TABLA N° 4.5 muestra los valores usados en la simulación N° 3, los valores de la TABLA N° 4.6 son el resultado de la simulación respectiva, el esquema se presenta en la Fig. 4.4.

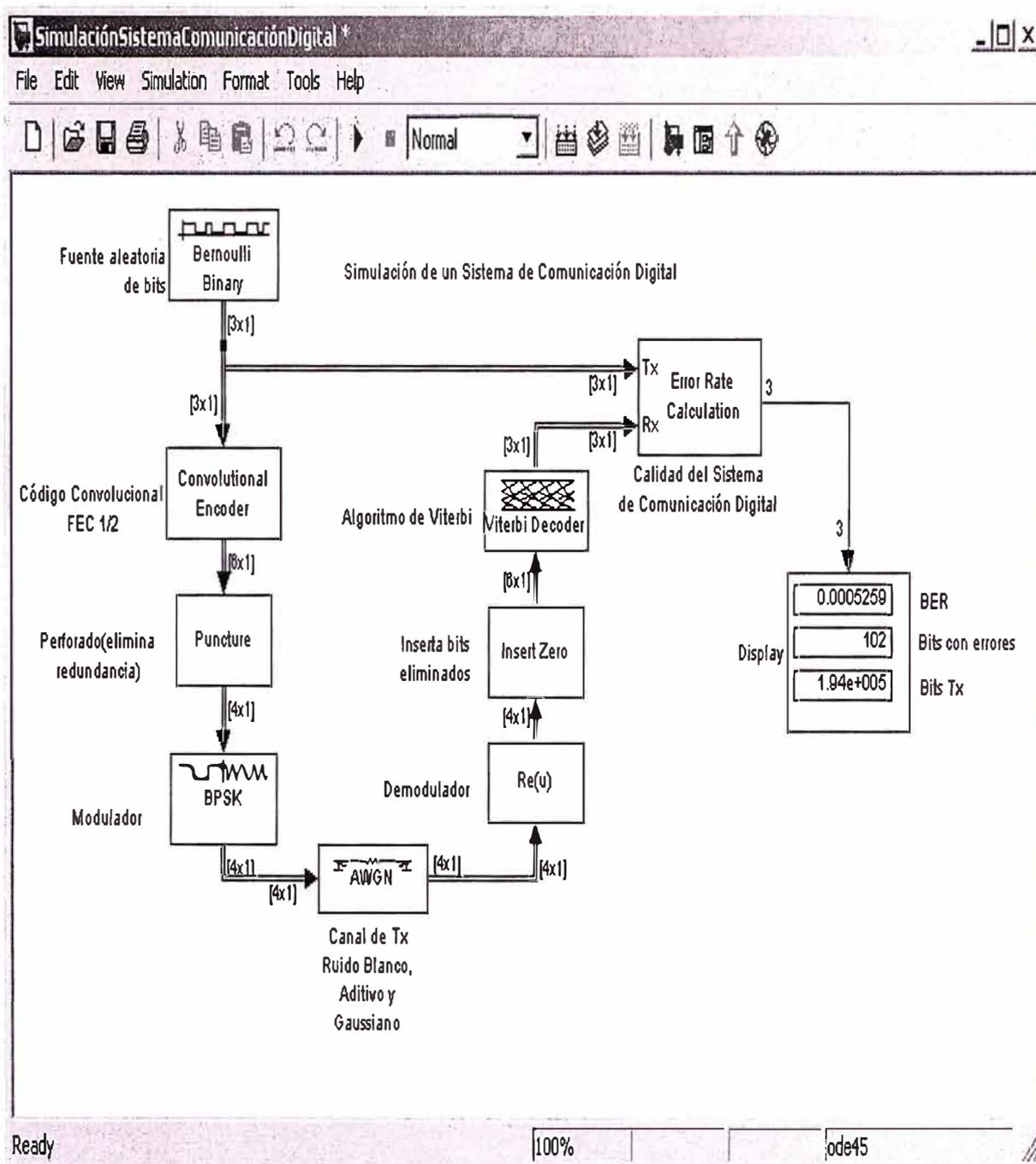


Fig. 4.4. Resultado de la simulación N° 3, tomando valores de la TABLA N° 4.5.

Observamos que el sistema de comunicación digital se cuelga al contabilizar alrededor de 100 bits errados.

Simulación N° 4

Tabla de valores

SNR (dB)	20
Es / No (dB)	2

ver TABLA N° 4.7

Bits Tx	2196	
BER	0.04554	
Bits con errores	(Bits Tx) * BER	100

ver TABLA N° 4.8

La TABLA N° 4.7 muestra los valores usados en la simulación N° 4, los valores de la TABLA N° 4.8 son el resultado de la simulación respectiva, el esquema se presenta en la Fig. 4.5.

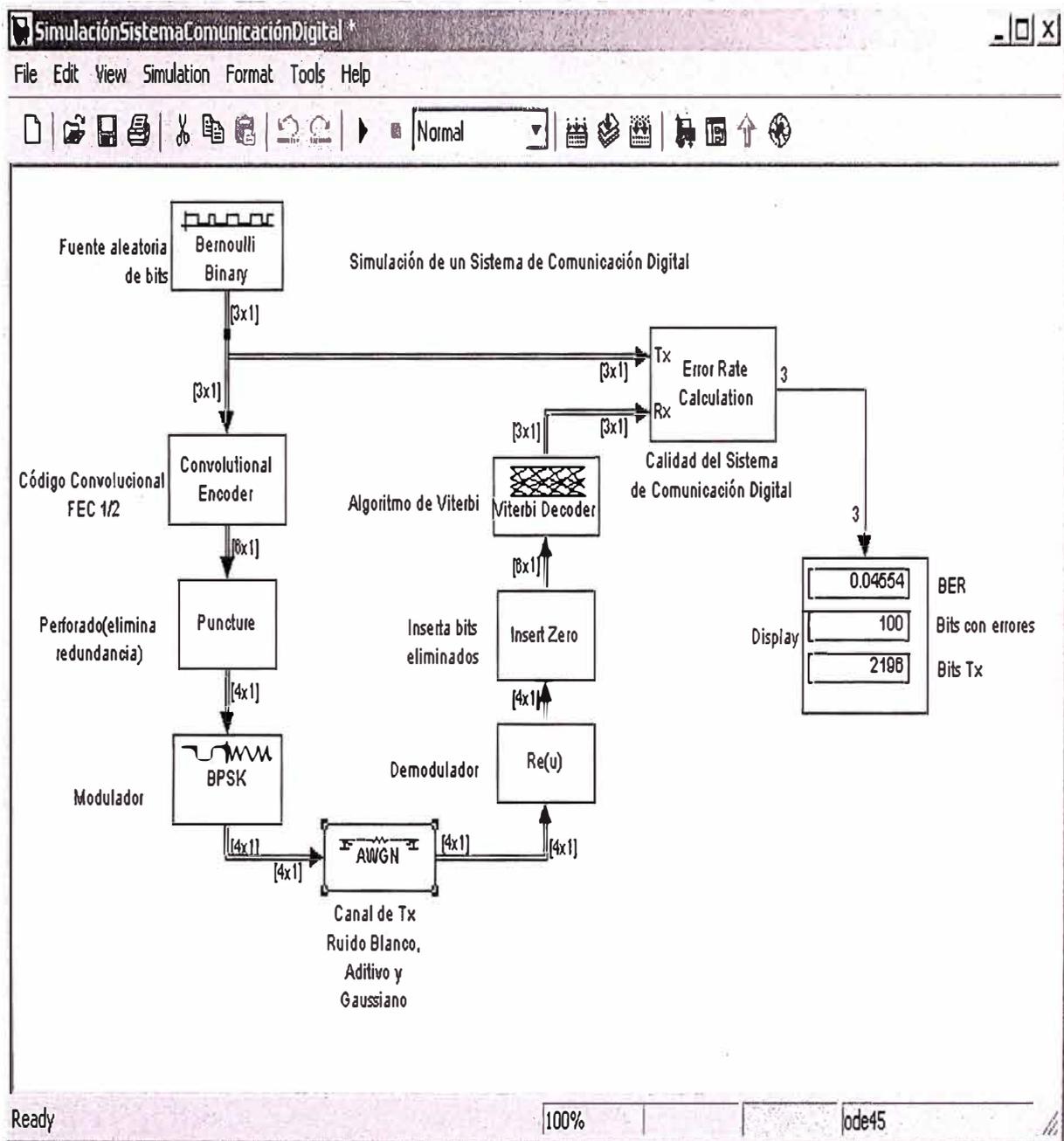


Fig. 4.5. Resultado de la simulación N° 4, tomando valores de la TABLA N° 4.7.

Notamos que un valor de SNR = 20 dB, es insuficiente para tener una buena calidad de enlace en el sistema de comunicación digital, el sistema contabiliza 100 bits errados y automáticamente pasa a un estado alerta o alarmas de desconexión o caída de servicio.

Simulación N° 5

Tabla de valores

SNR (dB)	10
Es / No (dB)	1

ver TABLA N° 4.9

Bits Tx	471	
BER	0.2123	
Bits con errores	(Bits Tx) * BER	100

ver TABLA N° 4.10

La TABLA N° 4.9 muestra los valores usados en la simulación N° 5, los valores de la TABLA N° 4.10 son el resultado de la simulación respectiva, el esquema se presenta en la Fig. 4.6.

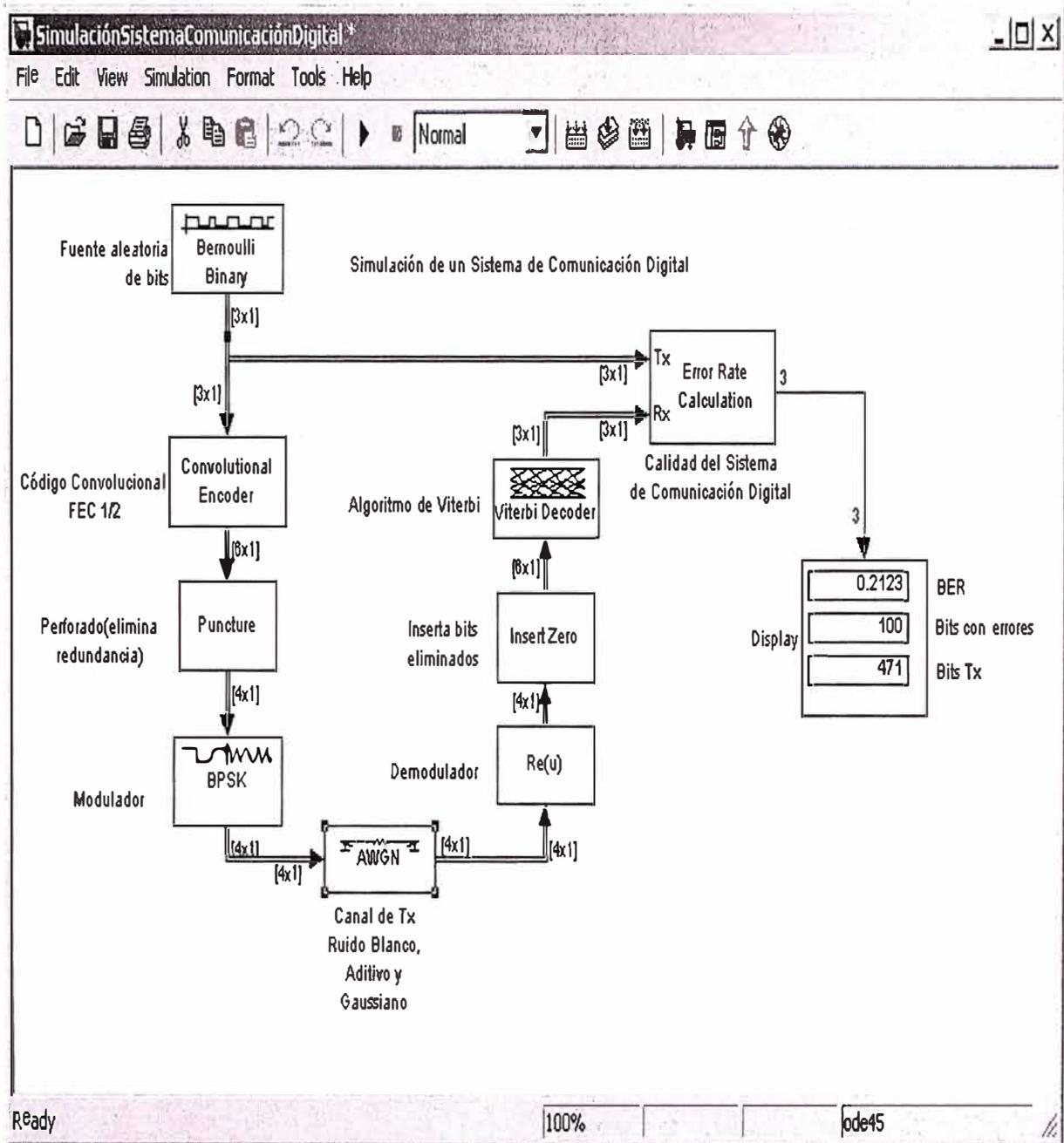


Fig. 4.6. Resultado de la simulación N° 5, tomando valores de la TABLA N° 4.9.

Notamos que un valor de SNR = 10 dB, es insuficiente para tener una buena calidad de enlace en el sistema de comunicación digital, el sistema contabiliza 100 bits errados y automáticamente pasa a un estado alerta o alarmas de desconexión o caída de servicio.

CONCLUSIONES

-La aplicación de procesamiento de señal digital tiene un campo muy amplio, en este caso se aplica al área de comunicaciones digitales vía el simulink del programa matlab 6.5, se presenta un esquema que realiza el cálculo del BER para diferentes valores de SNR y del E_s / N_0 .

-Al referirnos a un esquema de comunicación digital, el factor que determina el éxito del receptor en interpretar la señal recibida, esta dado por la relación señal a ruido SNR, tal como se percibe en las simulaciones anteriores.

-En la simulación N° 1, se tiene un valor SNR igual a 60 dB, y E_s / N_0 igual a 6 dB, al correr la simulación se tiene un BER igual a $7 \cdot 10^{-6}$, esto define una excelente calidad en el sistema de comunicación digital, ya que nos interesa cual es la probabilidad de que los bits transmitidos lleguen con errores, en este caso, al transmitir 1 000 000 bits (un millón de bits), existe la probabilidad de que 7 de ellos lleguen con error, mostrándonos una óptima calidad de enlace.

-En la simulación N° 2, se tiene un valor SNR igual a 50 dB, y E_s/N_0 igual a 5 dB, al correr la simulación se tiene un BER igual a $3.7 \cdot 10^{-5}$, esto define una buena calidad de enlace, se contabiliza 37 bits errados, es labor del ingeniero de comunicaciones determinar las fuentes que producen los errores, los cuales podrían ser resueltos desde el centro de gestión o realizando acciones en campo, por lo general se busca contar con algún medio de diversidad en la recepción.

- En la simulación N° 3, se tiene un valor SNR igual a 40 dB, y E_s/N_0 igual a 4 dB, al correr la simulación se tiene un BER igual a 0.0005259. Dicho valor lleva al sistema de comunicación digital a un estado de alarma, el esquema deja de generar los bits y por ende dejará de transmitirlos. En un sistema real de comunicación digital, al producirse una cantidad de bits errados mayor al máximo valor de bits errados permitidos en el software de comunicación, el gestor correspondiente cuelga el sistema de comunicación digital.

- En la simulación N° 4, se tiene un valor SNR igual a 20 dB, y E_s/N_0 igual a 2 dB, al correr la simulación se tiene un BER igual a 0.04554, esto define una calidad de enlace deficiente, notamos que en el esquema de comunicación digital se esta permitiendo a lo más alrededor de 100 bits errados, pasado ese valor el sistema de comunicación digital entra en estado crítico, los gestores por lo general dan alarmas en color rojo, indicando caída del servicio.

- En la simulación N° 5, se tiene un valor SNR igual a 10 dB, y E_s/N_0 igual a 1 dB, al correr la simulación se tiene un BER igual a 0.2123, el sistema de comunicación digital entra en estado de desconexión, tal como en la simulación N° 4.

-En un canal de comunicación, se debe tener presente que un aumento de la velocidad de transmisión aumentará la tasa de errores, un incremento en el ancho de banda permite un aumento en la velocidad de transmisión.

-Un aumento en la relación señal a ruido SNR reduce la tasa de errores y por consiguiente al aumentar el valor de SNR logramos tener menos bits errados.

-Con un valor de SNR igual o mayor 50 dB tenemos una calidad de enlace óptima, con un valor menor a los 50 dB, tenemos una calidad de enlace deficiente, tal como notamos en las simulaciones anteriores.

-El ruido esta presente en toda canal de comunicación, es aleatorio, y es lo que limita la capacidad de todo canal de comunicación.

-La velocidad de transmisión se mide en bit por segundos y representa la cantidad de bits que se envían en la unidad de tiempo.

-La capacidad de un canal de comunicación, es la velocidad a la que pueden ser transmitidos los datos por dicho medio físico y depende de la velocidad de transmisión, del ancho de banda de la señal, el nivel de ruido y la tasa de errores.

-La codificación de canal consiste en realizar un mapeo (añadir redundancia) de una secuencia de datos entrante en una secuencia de entrada al canal y realizar el mapeo inverso a la salida del canal en una secuencia de datos tal que los efectos del ruido están minimizados, la introducción de redundancia en la codificación de canal tiene como finalidad mejorar la confiabilidad de la transmisión.

APÉNDICE A

[1].- Se presenta una aplicación sobre el codificador convolucional (2,1,3) en la siguiente website: <http://www.isa.cie.uva.es/proyectos/codec/teoria4.html>

1.- Se eligen los valores para el tipo de codificación convolucional a utilizar (n,k,m).

The screenshot shows a web application interface with a black header containing the text "CODIGOS CONVOLUCIONALES". Below the header is a light purple background. In the center, there is a white rectangular box with a black border containing the following text and controls:

Seleccione una combinacion de valores para (n,k,m)

valor para n	valor para k,m
<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 1,2
<input checked="" type="radio"/> 2	<input checked="" type="radio"/> 1,3
<input type="radio"/> 3	
<input type="radio"/> 4	

Below the table is a button labeled "Aceptar".

At the bottom of the application window, there is a status bar with the text "Seleccion de la combinacion de valores para (n,k,m)" on the left and a button labeled "Nuevo" on the right.

2.- Elegimos las salidas para la memoria de codificador.

CODIGOS CONVOLUCIONALES

Seleccione una combinacion de valores para (n,k,m)

valor para n	valor para k,m
<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 1,2
<input checked="" type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 1,3
<input type="radio"/> 3	
<input type="radio"/> 4	

Seleccione los elementos de memoria para cada salida

Salida 1	Salida 2
<input checked="" type="checkbox"/> S1	<input type="checkbox"/> S1
<input type="checkbox"/> S2	<input checked="" type="checkbox"/> S2
<input type="checkbox"/> S3	<input type="checkbox"/> S3

Recepcion de los elementos que intervienen en cada salida

3.- Elegimos la longitud de la cadena de bits a codificar.

CODIGOS CONVOLUCIONALES

Codigo Convolutcional (2,1,3)

Diagram showing a convolutional encoder with two inputs (o1, o2) and three outputs (s1, s2, s3). The inputs are shifted and combined to produce the outputs.

Diagrama de Trellis

salidas	A
	00
	11
salidas	B
	00
	11
salidas	C
	00
	11
salidas	D
	00
	11

Seleccione longitud de la cadena de entrada 6 7 8 9 10

Fase de Codificacion : Selecccion de la longitud de la cadena original

4.- Se coloca los bits a codificar.

CODIGOS CONVOLUCIONALES

Codigo Convolutacional (2,1,3)

Diagrama de Trellis

	A										
salidas	00										
	11										
B											
salidas	00										
	11										
C											
salidas	00										
	11										
D											
salidas	00										
	11										

Introduzca los valores de la cadena de entrada

Fase de Codificacion : Recepcion de la cadena original

5.- La aplicación devuelve la codificación correspondiente.

CODIGOS CONVOLUCIONALES

Codigo Convolutacional (2,1,3)

CODIFICACION

		0	1	0	1	1	1
cadena entrada							
cadena codificada		00	11	00	11	11	11
A							
salidas	00						
	11						
B							
salidas	00						
	11						
C							
salidas	00						
	11						
D							
salidas	00						
	11						

Fase de Codificacion : Pulse 'Transmitir' para transmitir la cadena codificada al canal
Pulse 'Nueva Codificacion' para codificar una nueva cadena original

6.- Luego de la codificación, los bits entran al canal de transmisión.

CODIGOS CONVOLUCIONALES

TRANSMISION POR EL CANAL

palabra :

DECODIFICACION

Fase de Transmision por el Canal : Realice los cambios que desee en la cadena transmitida
Pulse 'Iniciar Decodificacion' para enviar la cadena al decodificador

7.- Al recibir la secuencia transmitida, los bits quedan listos para la decodificación.

CODIGOS CONVOLUCIONALES

TRANSMISION POR EL CANAL

palabra :

DECODIFICACION

		00	11	00	11	11	11
cadena recibida	A						
	salidas	00					
	B						
	salidas	00					
	C						
	salidas	00					
	D						
	salidas	00					

Fase de decodificacion : Pulse 'Siguiete Paso' para realizar un paso de la decodificacion
Pulse 'Terminar' para terminar la decodificacion

8.- Luego de la codificación de canal, se obtiene la secuencia inicial.

CODIGOS CONVOLUCIONALES

TRANSMISION POR EL CANAL

palabra :

DECODIFICACION

cadena recibida	00	11	00	11	11	11
A						
salidas		0	2	2	4	4
B						
salidas		2	0	4	0	2
C						
salidas			4	0	4	2
D						
salidas			2	2	0	0

Fase de Decodificación : se calculan los caminos minimos para cada estado
 camino minimo = dist_min del estado anterior + distancia entre palabra recibida y salida asociada

9.- Se obtienen los bits libre de errores, ya que la aplicación se orienta a codificación.

CODIGOS CONVOLUCIONALES

TRANSMISION POR EL CANAL

palabra :

DECODIFICACION

cadena recibida	00	11	00	11	11	11
A						
salidas		0	2	2	4	4
B						
salidas		2	0	4	0	2
C						
salidas			4	0	4	2
D						
salidas			2	2	0	0

cadena decodificada	0	1	0	1	1	1
cadena original	0	1	0	1	1	1

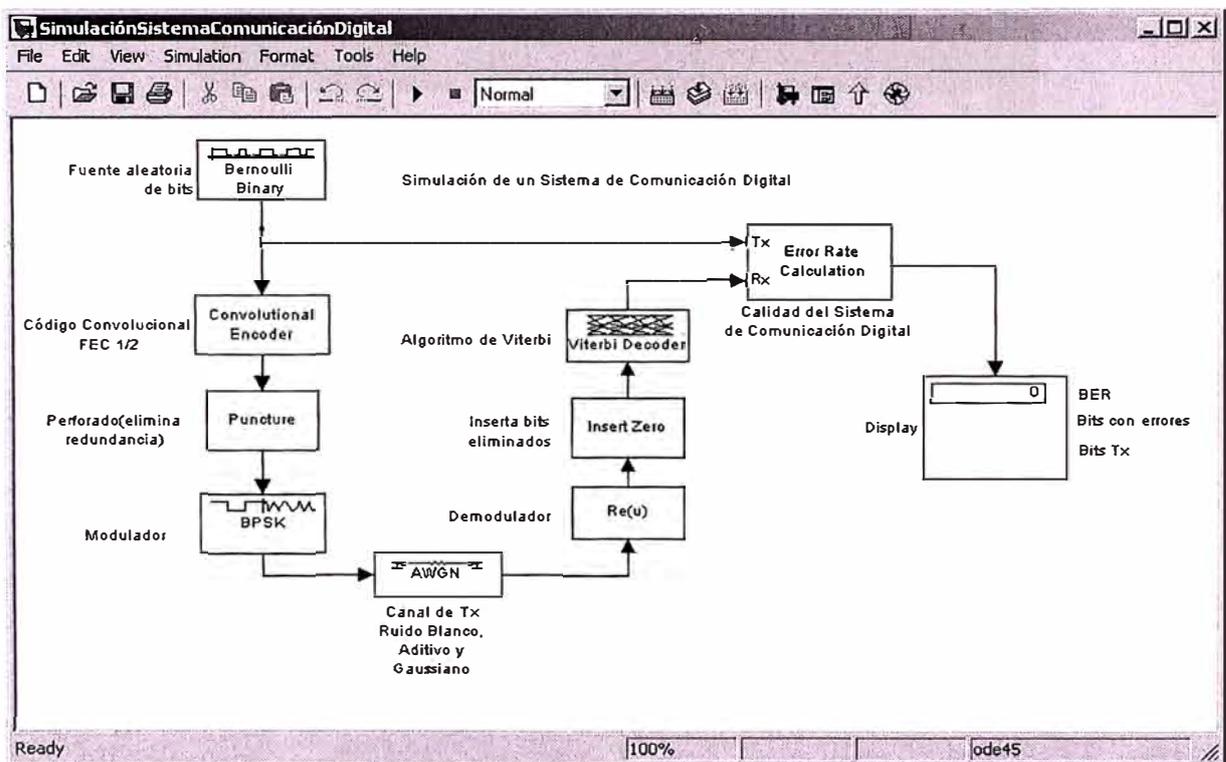
cadena decodificada es igual a cadena original, el canal no introdujo errores en la cadena enviada por el codificador

Ejemplo concluido. Pulse 'Nuevo' para un nuevo ejemplo. Pulse 'Nueva Transmision' para modificar la cadena del canal
 Pulse 'Nueva Codificacion' para codificar una nueva cadena original.

APÉNDICE B

[2].- Se presenta como aplicación práctica el cálculo del BER (Bit Error Rate).

1.-Esquema para el cálculo de la tasa de error o BER.



El éxito en el demodulador, al momento de recuperar la señal depende de la relación señal a ruido SNR, cuanto mayor sea dicho valor menor será la tasa de errores.

2.- Para el cálculo del BER (Bit Error Rate), variamos la relación señal a ruido SNR.

Block Parameters:

AWGN Channel (mask) (link)

Add white Gaussian noise to the input signal. The input and output signals can be real or complex. This block supports multichannel input and output signals as well as frame-based processing.

When using either of the variance modes with complex inputs, the variance values are equally divided among the real and imaginary components of the input signal.

Parameters

Initial seed:
123456

Mode: Signal to noise ratio (SNR)

SNR (dB):
10

Input signal power (watts):
1

OK Cancel Help Apply

3.- La variación de la relación señal a ruido SNR nos lleva a variar la relación energía de bits a ruido E_s / N_0 .

Block Parameters:

AWGN Channel (mask) (link)

Add white Gaussian noise to the input signal. The input and output signals can be real or complex. This block supports multichannel input and output signals as well as frame-based processing.

When using either of the variance modes with complex inputs, the variance values are equally divided among the real and imaginary components of the input signal.

Parameters

Initial seed:
123456

Mode: Signal to noise ratio (E_s/N_0)

E_s/N_0 (dB):
2

Input signal power (watts):
1

Symbol period (s):
1

OK Cancel Help Apply

Con los diferentes valores de la relación señal a ruido, calculamos la tasa de error BER (Bit Error Rate).

BIBLIOGRAFÍA

[1] ASHOK AMBARDAR, “PROCESAMIENTO DE SEÑALES ANALÓGICAS Y DIGITALES”, Michigan Technological University – EEUU, 2002.

[2] ALAN V. OPPENHEIM Y ALAN S. WILLSKY, “SEÑALES Y SISTEMAS”, Prentice-Hall Hispanoamericana, 1983.

[3] DIVISIÓN DE TELECOMUNICACIONES, “COMUNICACIONES INALÁMBRICAS”, INICTEL, 2003.

[4] Web Site <http://www.albertomurillo.com>

[5] Web Site <http://www.isa.cie.uva.es/proyectos/codec/teoria4.html>

[6] Web Site <http://alek.pucp.edu.pe/Acom/lacom>

[7] Web Site <http://www.isa.cie.uva.es/proyectos/codec/teoria4.html>

[8] Simulink – Matlab 6.5.