

Comunicaciones de Datos

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura.
Universidad Nacional del Nordeste

Guía Serie de Trabajos Prácticos N° 4 Codificación y Modulación

Introducción

Tanto la información analógica como la digital pueden ser codificadas mediante señales analógicas o digitales. La elección de un tipo particular de codificación dependerá de los requisitos exigidos, del medio de transmisión, así como de los recursos disponibles para la comunicación.

La forma más sencilla de codificar digitalmente datos digitales es asignar un nivel de tensión al uno binario y otro distinto para el cero. Para mejorar las prestaciones es posible utilizar otros códigos distintos, alterando el espectro de la señal y proporcionando capacidad de sincronización.

Los módems convierten los datos digitales en señales analógicas de tal manera que se puedan transmitir a través de líneas analógicas. Las técnicas básicas son desplazamiento de amplitud (ASK: Amplitude-Shift Keying), desplazamiento de frecuencia (FSK: Frequency-Shift Keying) y desplazamiento de fase (PSK: Phase-Shift Keying). En todas ellas, para representar los datos digitales se modifican uno o más parámetros característicos de la señal portadora.

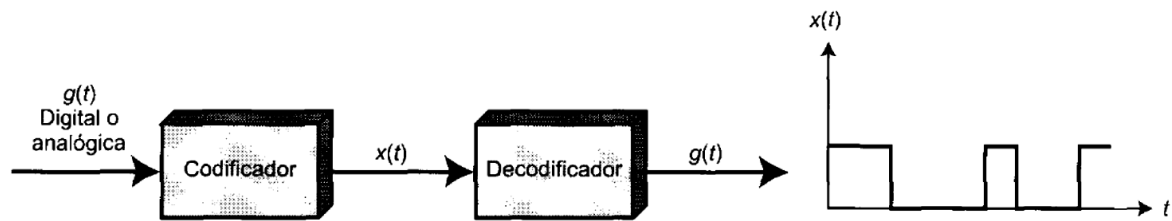
Los datos analógicos, como, por ejemplo, voz y video, se digitalizan para ser transmitidos mediante sistemas digitales. La técnica más sencilla es la modulación por codificación de impulsos (PCM: Pulse Code Modulation), que implica un muestreo periódico de los datos analógicos y una cuantización de las muestras.

Los datos analógicos se modulan mediante una portadora para generar una señal analógica en una banda de frecuencias diferente, que se puede utilizar en un sistema de transmisión analógico. Las técnicas básicas son modulación en amplitud (AM: Amplitude Modulation), modulación en frecuencia (FM: Frequency Modulation) y modulación en fase (PM: Phase Modulation).

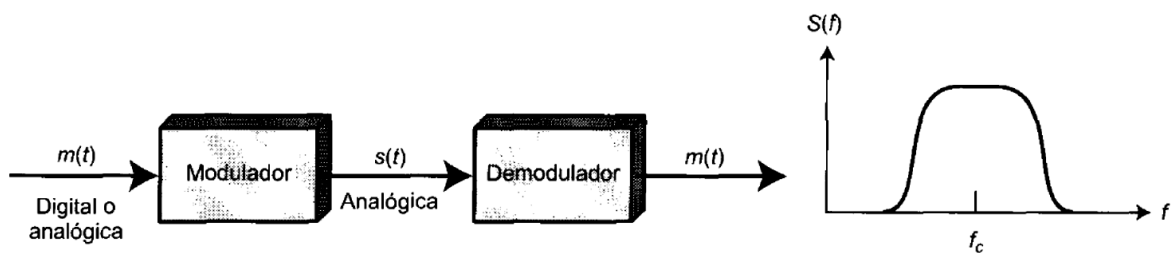
En la *señalización digital*, una fuente de datos $g(t)$, que puede ser tanto analógica como digital, se codifica en una señal digital $x(t)$. La forma de onda en particular que adopte $x(t)$ dependerá de la técnica de codificación elegida (Fig. 1a).

La *transmisión analógica* se basa en una señal continua de frecuencia constante denominada *portadora*. Los datos se pueden transmitir modulando la señal portadora. La modulación es el proceso de codificar los datos generados por la fuente, en la señal portadora de frecuencia f_c . Todas las técnicas de modulación implican la modificación de uno o más de los tres parámetros fundamentales de la portadora: amplitud, frecuencia y fase.

La señal de entrada $m(t)$ se denomina señal moduladora o señal en banda base. A la señal resultante de la modulación de la señal portadora se denomina señal modulada $s(t)$ (Fig. 1b).



(a) Codificación sobre una señal digital



(b) Modulación sobre una señal analógica

Fig. 1. Codificación y modulación [2].

Codificación de datos digitales en señales digitales

Una señal digital es una secuencia de pulsos de tensión discretos y discontinuos, donde cada pulso es un elemento de señal. Los datos binarios se transmiten codificando cada bit de datos en cada elemento de señal. En el caso más sencillo, habrá una correspondencia uno a uno entre bits y elementos de señal.

Si todos los elementos de señal tienen el mismo signo algebraico, la señal es unipolar. En una señal polar, un estado lógico se representará mediante un nivel positivo de tensión y el otro, mediante un nivel negativo. La razón de datos de una señal, o simplemente la velocidad de transmisión de una señal, es la velocidad expresada en bits por segundo, a la que se transmiten los datos. La duración o longitud de un bit se define como el tiempo empleado en el transmisor para emitir un bit; para una velocidad de transmisión R , la duración de un bit es $1/R$. La velocidad de modulación, por el contrario, es la velocidad a la que cambia el nivel de la señal y depende del esquema de codificación elegido. La velocidad de modulación se expresa en baudios, que equivale a un elemento de señal por segundo.

Las tareas involucradas al interpretar las señales digitales en el receptor se pueden resumir en: i) conocer o determinar la duración de cada bit y ii) determinar si el nivel para cada bit es alto o bajo.

Existen tres factores importantes que determinan el éxito o el fracaso del receptor al interpretar la señal de entrada: la SNR (más precisamente el cociente E_b/N_0 , la velocidad de transmisión y el ancho de banda.

El esquema de codificación, la correspondencia que se establece entre los bits de datos con los elementos de señal, es otro factor que se puede utilizar para mejorar las prestaciones del sistema.

En la evaluación y comparación de las diferentes técnicas de codificación se considera: el espectro de la señal, sincronización, detección de errores, inmunidad al ruido e interferencias, coste y complejidad.

A continuación describiremos y ejemplificaremos las técnicas de codificación de la Tabla 1.

Tabla 1. Definición de los formatos de codificación digital [2]

No retorno a cero (NRZ-L) 0 = nivel alto 1 = nivel bajo
No retorno a cero invertido (NRZI) 0 = no hay transición al comienzo del intervalo (un bit cada vez) 1 = transición al comienzo del intervalo
Bipolar-AMI 0 = no hay señal 1 = nivel positivo o negativo, alternante
Pseudoternario 0 = nivel positivo a negativo, alternante 1 = no hay señal
Manchester 0 = transición de alto a bajo en mitad del intervalo 1 = transición de bajo a alto en mitad del intervalo
Manchester diferencial Siempre hay una transición en mitad del intervalo 0 = transición al principio del intervalo 1 = no hay transición al principio del intervalo
B8ZS Igual que el bipolar-AMI, excepto que cualquier cadena de ceros se reemplaza por una cadena que tiene dos violaciones de código.
HDB3 Igual que el bipolar-AMI, excepto que cualquier cadena de cuatro ceros se reemplaza por una cadena que contiene una violación de código.

La forma más frecuente y fácil de transmitir señales digitales es mediante la utilización de un nivel diferente de tensión para cada uno de los dos dígitos binarios. Los códigos que siguen la estrategia **no retorno a cero** (NRZ: Nonreturn to zero), comparten la propiedad de que el nivel de tensión se mantiene constante durante la duración del bit, es decir, no hay transiciones (no hay retorno al nivel cero de tensión). Por ejemplo, la ausencia de tensión se puede usar para representar un 0 binario, mientras que un nivel constante y positivo de tensión puede representar al 1 (Fig. 2).

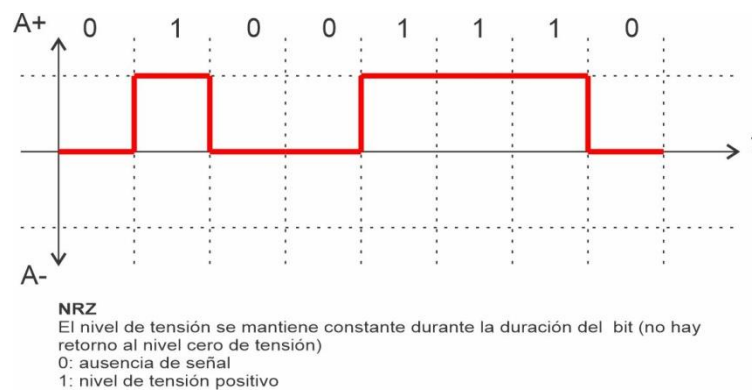


Fig. 2. Estrategia NRZ.

Es más habitual usar un nivel negativo para representar un valor binario y una tensión positiva para representar al otro. Este código se denomina **Nivel no retorno a cero** (NRZ-L: Nonreturn to zero level) y es utilizado generalmente para generar o interpretar los datos binarios en terminales y otros dispositivos (Fig. 3).

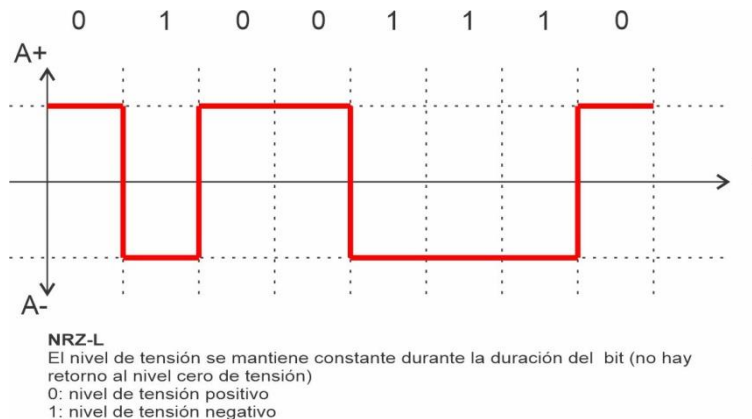


Fig. 3. Esquema de codificación NRZ-L.

Una variante del NRZ, denominada **no retorno a ceros invertido** (NRZI: Nonreturn to zero, invert on ones), codifica los datos mediante la presencia o ausencia de una transición de la señal al principio del intervalo de duración del bit. Un 1 binario se codifica mediante la transición (bajo a alto o alto a bajo) al principio del intervalo de señalización, mientras que un cero se representa por la ausencia de transición (Fig. 4).

NRZI es un ejemplo de *codificación diferencial*, en lugar de determinar el valor absoluto, la señal se decodifica comparando la polaridad de los elementos de señal adyacentes. En términos generales, la codificación de cada bit se hace de la siguiente manera: si se trata del valor binario 0, se codifica con la misma señal que el bit anterior, si se trata de un valor binario 1, entonces se codifica con una señal diferente que la utilizada para el bit precedente.

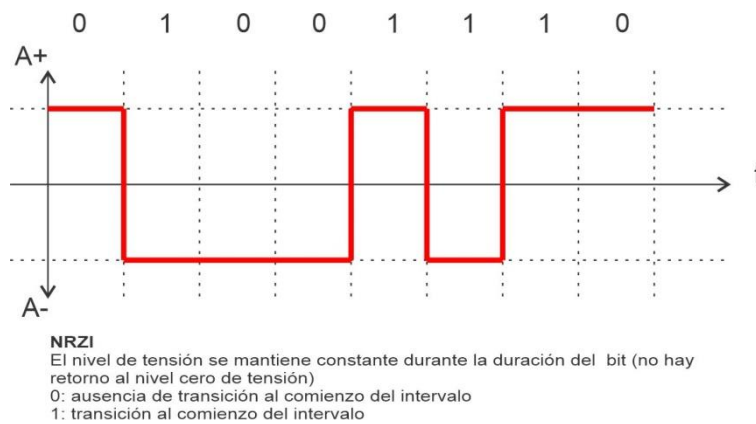


Fig. 4. Esquema de codificación NRZI.

Las técnicas denominadas binario multinivel, utilizan más de dos niveles de señal por ejemplo, Bipolar-AMI (Alternate Mark Inversión) y pseudoternario.

En el caso del esquema Bipolar-AMI (Fig. 5), un 0 binario se representa por ausencia de señal y el 1 binario con pulsos de polaridad alternada.

El esquema pseudoternario (Fig. 6), representa el 1 binario por la ausencia de señal y el 0 binario mediante pulsos de polaridad alternada.

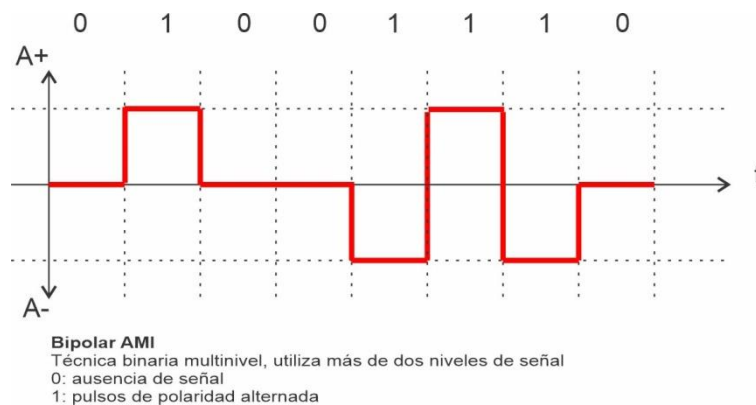


Fig. 5. Esquema Bipolar-AMI.

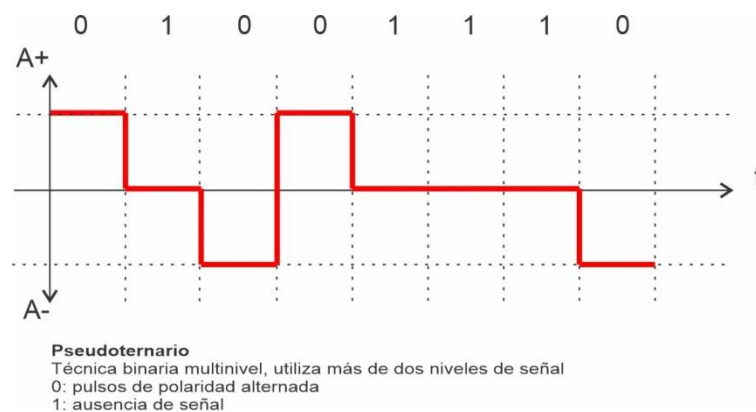


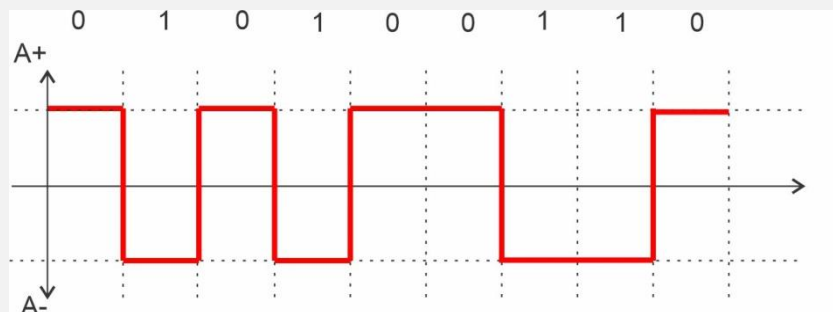
Fig. 6. Esquema pseudoternario.

Ejemplo 1. Para la cadena de bits 010100110, representar las formas de onda en cada uno de los siguientes códigos:

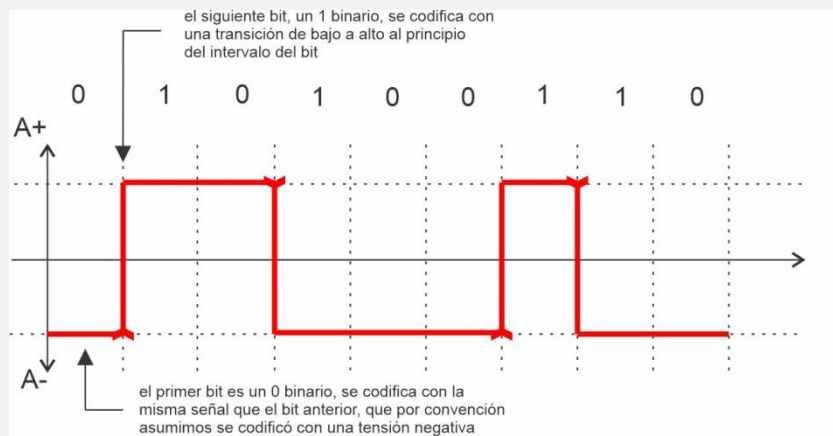
- a) NRZ-L,
- b) NRZI y
- c) Bipolar AMI.

Representamos la correspondencia que se establece entre los bits de datos con los elementos de señal en un par de ejes cartesianos. Sobre los ejes vertical y horizontal, representamos los niveles de señal y el tiempo respectivamente.

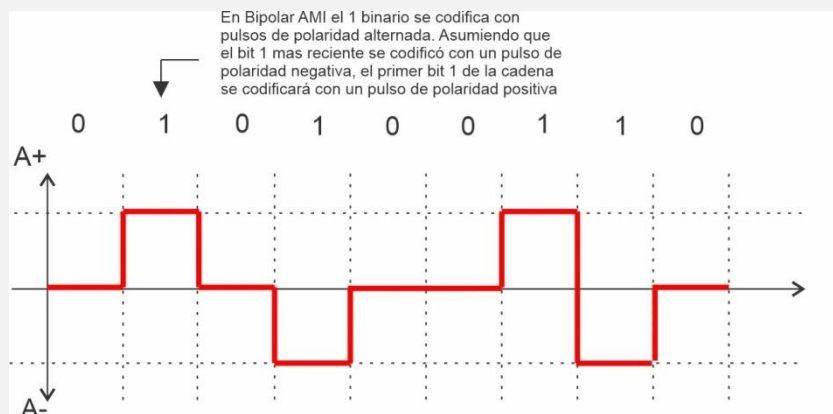
- a) NRZ-L: utilizaremos un nivel negativo para representar el 1 binario y una tensión positiva para representar el 0 binario (Tabla 1).



- b) NRZ-I: codificaremos un 1 binario mediante una transición (bajo a alto o alto a bajo) al principio del intervalo de señalización, mientras que un cero lo representaremos por la ausencia de transición (Tabla 1). Al tratarse de un esquema diferencial, pueden surgir dudas con respecto a la codificación del primer bit en la cadena, es decir, ¿con qué nivel de señal se codificó el valor binario anterior a la cadena a codificar? **Para evitar ambigüedades, a no ser que se especifique en el problema, supondremos que el bit más reciente se codificó con una señal de polaridad negativa.** En este caso, el primer bit a codificar es un 0 binario, por lo tanto lo codificaremos con un nivel de tensión negativo (con la misma señal que el bit anterior), puesto que el problema no aclara nada al respecto.



- c) Bipolar AMI: un 0 binario se representa por ausencia de señal y el 1 binario se representa con pulsos de polaridad alternada. Puesto que el 1 binario en Bipolar AMI se codifica con pulsos de polaridad alternada, puede surgir la pregunta ¿con qué polaridad codifico el primer 1 binario en la cadena a codificar? **Para evitar ambigüedades, a no ser que se especifique en el problema, supondremos que el bit más reciente se codificó con una señal de polaridad negativa.** Por tanto y dado que el problema no lo especifica, el primer 1 binario en la cadena se codificará con un pulso de polaridad positiva.



Los esquemas Manchester y Manchester diferencial, técnicas de codificación denominadas *bifase* y utilizadas frecuentemente en sistemas de comunicación, fuerzan al menos una transición por cada bit pudiendo tener hasta dos en ese mismo periodo.

En el código Manchester (Fig. 7), siempre hay una transición en mitad del intervalo de duración del bit. Esta, sirve como un procedimiento de sincronización a la vez que permite transmitir los datos. Una transición de bajo a alto representa un 1 binario y una transición de alto a bajo representa un 0 binario.

En Manchester diferencial (Fig. 8), la transición a mitad del intervalo se utiliza sólo para proporcionar sincronización. La codificación de un 0 se representa por la presencia de una transición al principio del intervalo del bit y un 1 binario se representa mediante la ausencia de una transición al principio del intervalo.

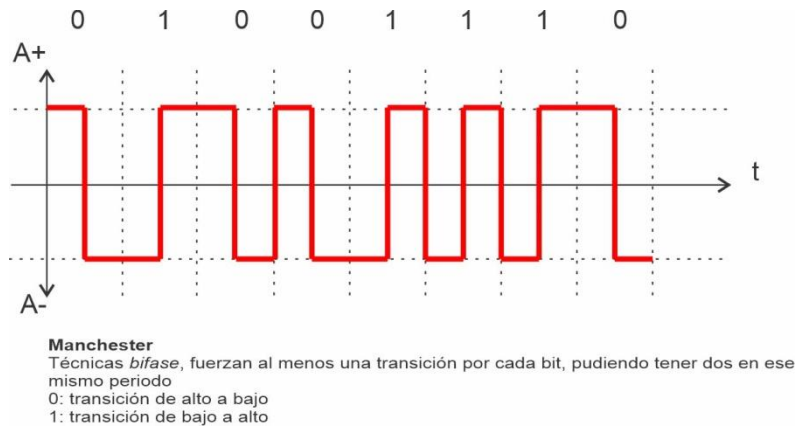


Fig. 7. Esquema Manchester.

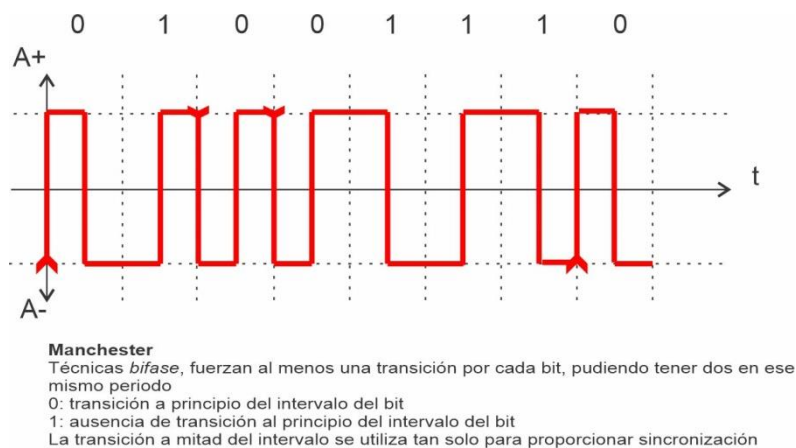
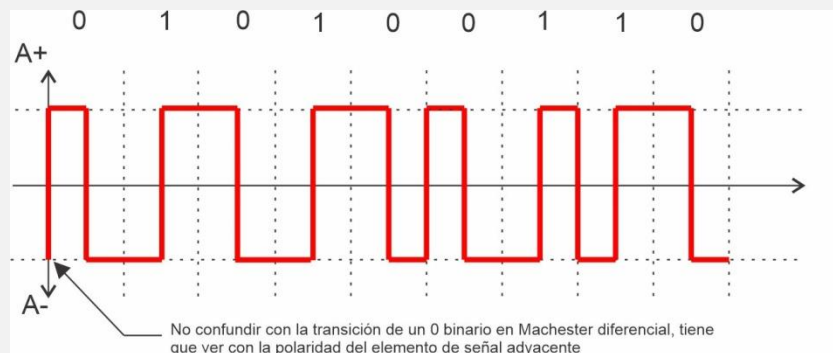


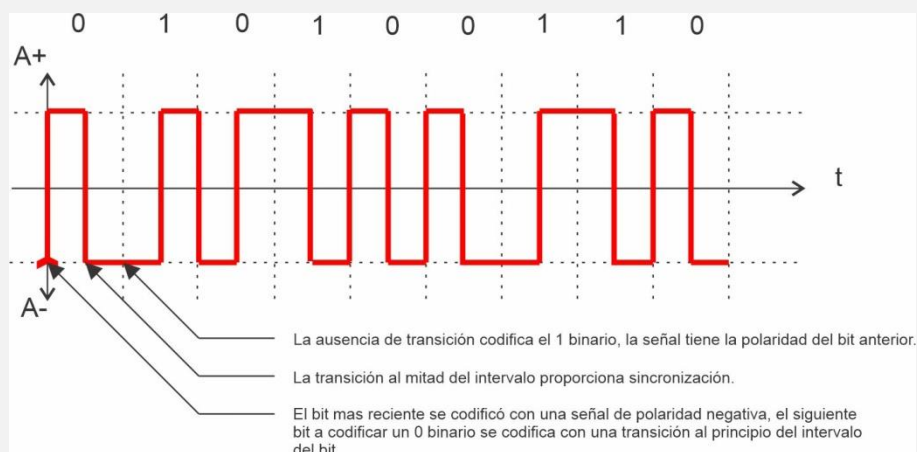
Fig. 8. Esquema Manchester diferencial.

Ejemplo 2. Para la cadena de bits 010100110, representar las formas de onda resultante de codificarla utilizando los esquemas Manchester y Manchester diferencial.

En esquema Manchester, siempre hay una transición en mitad del intervalo de duración del bit. Una transición de bajo a alto representa un 1 binario y una transición de alto a bajo representa un 0 binario (Tabla 1). **Para evitar ambigüedades, a no ser que se especifique en el problema, supondremos que el bit más reciente se codificó con una señal de polaridad negativa.** Por lo tanto, el primer 0 binario en la cadena se codifica con una transición de alto a bajo a mitad del intervalo de duración del bit.



En Manchester diferencial (Tabla 1), la transición a mitad del intervalo se utiliza sólo para proporcionar sincronización. La codificación de un 0 se representa por la presencia de una transición al principio del intervalo del bit y un 1 binario se representa mediante la ausencia de una transición al principio del intervalo. Teniendo en cuenta la polaridad del elemento de señal adyacente, el primer 0 binario de la cadena se codifica con una transición al principio del intervalo del bit, la transición a mitad del intervalo proporcional sincronización.



Las técnicas de altibajos se utilizan frecuentemente en las comunicaciones a larga distancia. Un esquema que se usa habitualmente en Norteamérica se denomina bipolar con sustitución de 8 ceros (B8ZS: Bipolar with 8-Zeros Substitution) se basa en Bipolar-AMI (Fig. 9). Para evitar el inconveniente en que una cadena larga de ceros puede dar lugar a una pérdida de sincronización, la codificación se realiza de acuerdo con las siguientes reglas:

- Si aparece un octeto con todos ceros y el último valor de tensión anterior a dicho octeto fue positivo, codificar dicho octeto como 000+-0-+.
- Si aparece un octeto con todos ceros y el último valor de tensión anterior a dicho octeto fue negativo, codificar dicho octeto como 000-+0+-.

Con este procedimiento se fuerzan dos violaciones de código del código AMI.

El esquema de codificación habitualmente utilizado en Europa y Japón es el denominado bipolar 3 de alta densidad (HDB3: High Densitiy Bipolar-3 Zeros). Al igual que B8Zs, se base en Bipolar-AMI. En este esquema (Fig. 10), se reemplazan las cadenas de cuatro ceros por cadenas que contienen uno o dos pulsos. En este caso, el cuarto cero se sustituye una violación de código. Además, en las violaciones siguientes, se considera una regla adicional para asegurar que las mismas tengan una polaridad alternada, evitando así la introducción de componente en continua. Es decir, si la última violación fue positiva, la siguiente deberá ser negativa y viceversa. En la Tabla 2 se indica que esta condición se determina dependiendo (1) si el número de pulsos desde la última violación es par o impar y (2) dependiendo de la polaridad del último pulso anterior a la aparición de los cuatro ceros.

Tabla 2. Reglas de sustitución en HDB3 [2].

	Número de pulsos bipolares (unos) desde la última sustitución	
Polaridad del pulso anterior	Impar	Par
–	000 –	+ 00 +
+	000 +	– 00 –

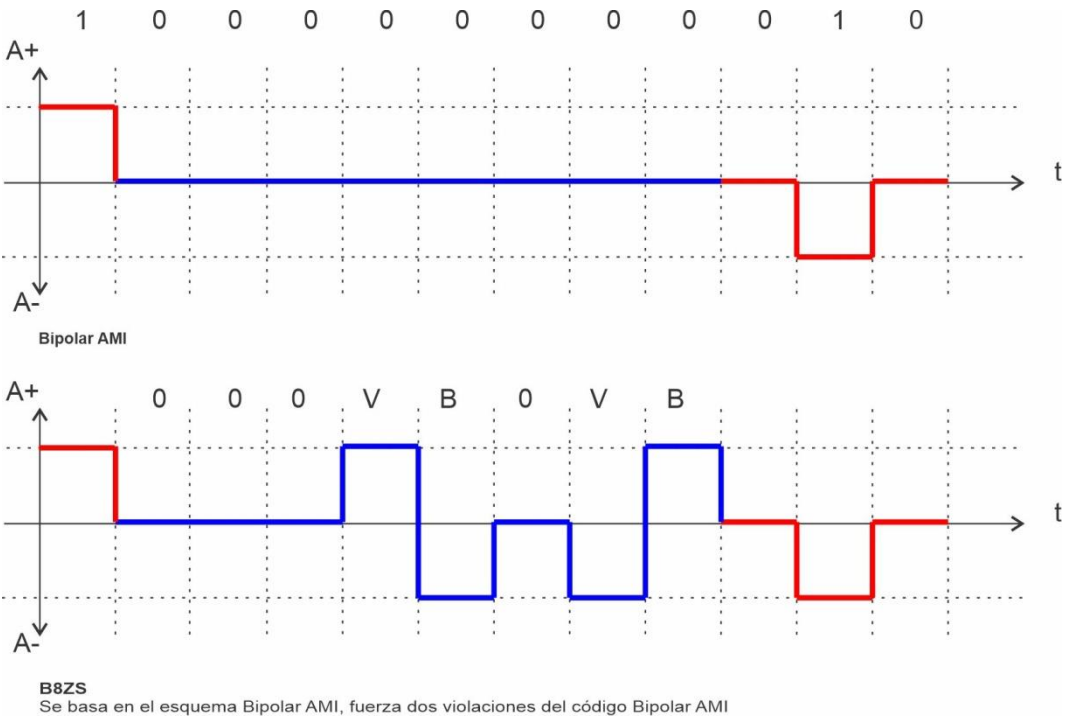


Fig. 9. Esquema B8ZS.

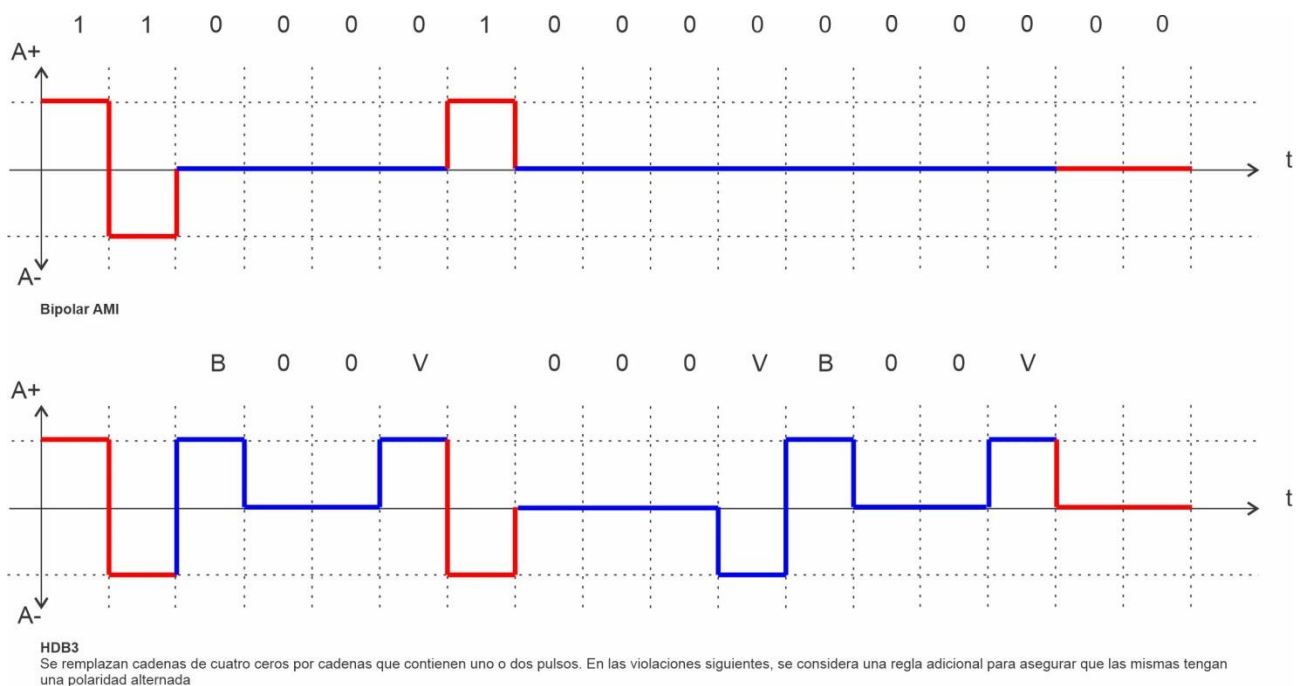
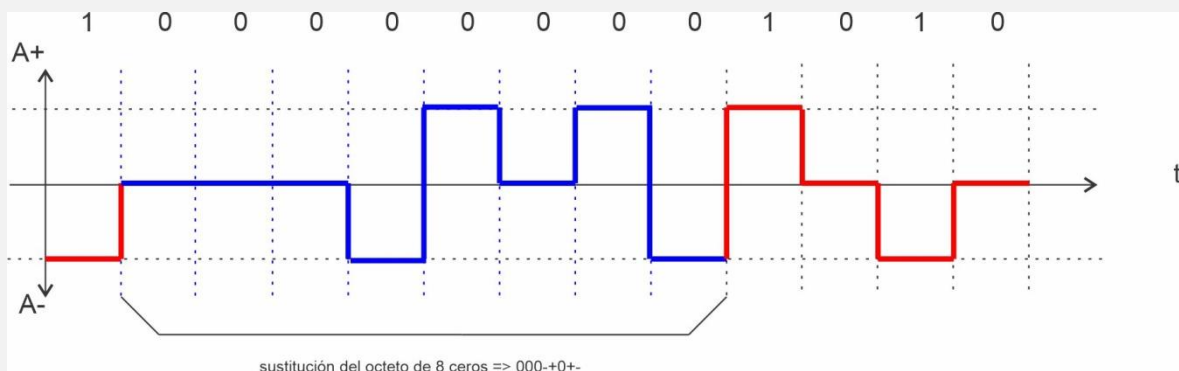


Fig. 10. Esquema HDB3.

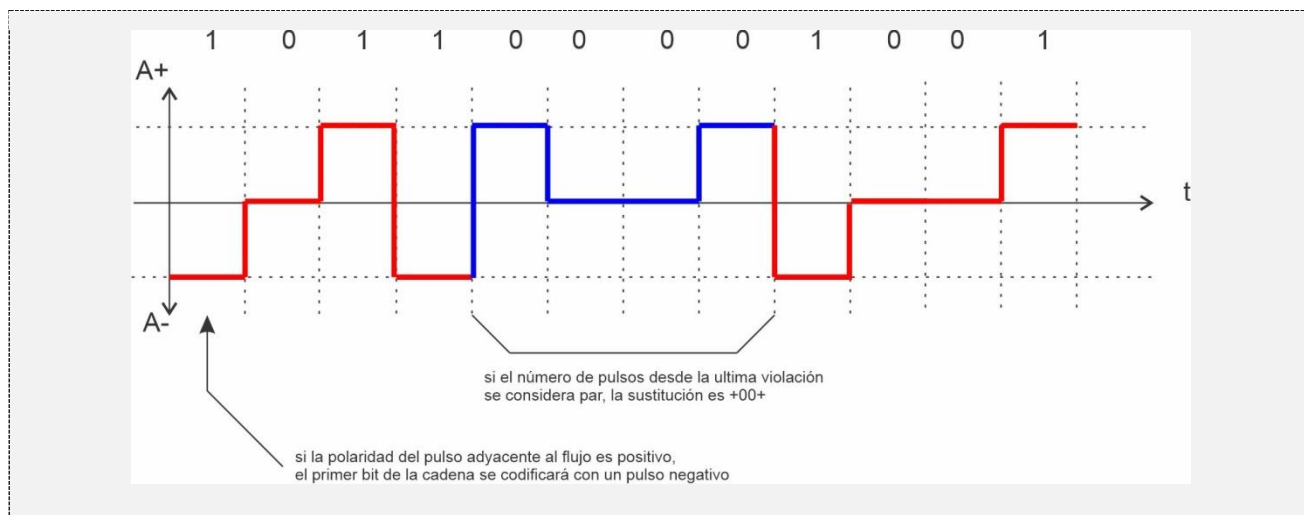
Ejemplo 3. Codificar el flujo de bits 1000000001010 utilizando el esquema B8ZS. Considere que el primer pulso bipolar es negativo.

De acuerdo con la regla de sustitución, si el primer pulso bipolar es negativo, el octeto de 8 ceros se codificará como 000-+0+.-.



Ejemplo 4. Codificar el flujo de bits 101100001001 utilizando el esquema HDB3. Considere que el primer pulso bipolar es negativo. Considere la polaridad del pulso adyacente a la cadena de bits como negativo y el número de pulsos desde la última violación es par.

En la Tabla 2 se indican las reglas de sustitución para el esquema HDB3. Si consideramos la polaridad del pulso adyacente a la cadena de bits como positivo y el número de pulsos desde la última violación es par, la forma de onda resultante es:



Técnicas de modulación de datos digitales en señales analógicas

La modulación involucra a uno o más de los parámetros característicos de la señal portadora: la amplitud, la frecuencia y la fase. Por consiguiente, existen tres técnicas básicas de modulación, que transforman datos digitales en señales analógicas:

- Desplazamiento de amplitud (ASK).
- Desplazamiento de frecuencia (FSK).
- Desplazamiento de fase (PSK).

En todos los casos, la señal resultante ocupa un ancho de banda centrado en torno a la frecuencia de la portadora.

En ASK (Fig. 11), los dos valores binarios se representan mediante dos amplitudes diferentes de la portadora. Es usual que una de las amplitudes sea cero, es decir, uno de los dígitos binarios se representa mediante la presencia de la portadora en amplitud, y el otro mediante la ausencia de la portadora. La señal resultante es:

$$s(t) = \begin{cases} A \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot t); & 1 \text{ binario} \\ 0; & 0 \text{ binario} \end{cases}$$

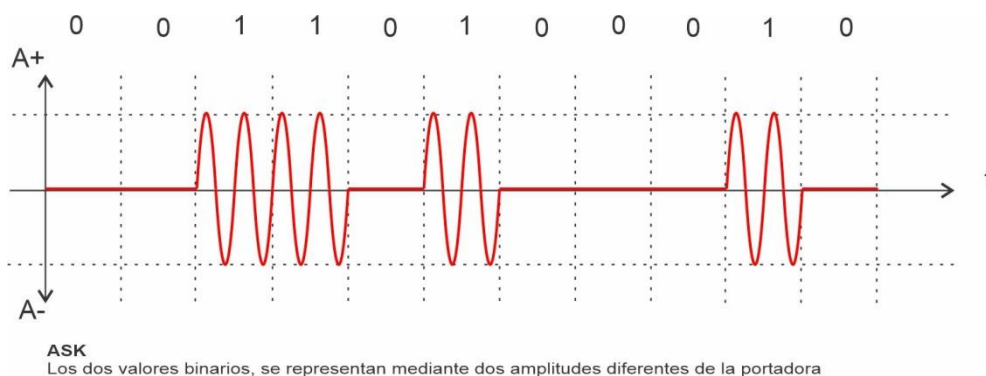


Fig. 11. Modulación ASK.

En FSK (Fig. 12), los dos valores binarios se representan mediante dos frecuencias diferentes próximas a la frecuencia de la portadora. La señal resultante es:

$$s(t) = \begin{cases} A \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot t); & 1 \text{ binario} \\ A \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_2 \cdot t); & 0 \text{ binario} \end{cases}$$

Donde típicamente f_1 y f_2 corresponden a desplazamientos de la frecuencia portadora f_c , de igual magnitud pero en sentidos opuesto.

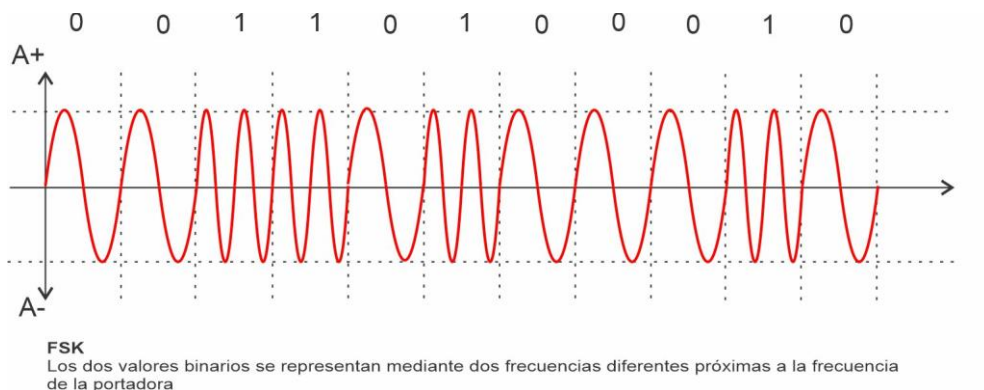


Fig. 12. Modulación FSK.

En PSK, la fase de la señal portadora se desplaza para representar con ello a los datos digitales. En un sistema que utiliza dos fases (Fig. 13), un 0 binario se representa mediante la transmisión de una señal con la misma fase de la señal anteriormente enviada. Mientras que un 1 binario, se representa mediante la transmisión de una señal cuya fase está en oposición de fase respecto a la señal precedente. Esta técnica se conoce como PSK diferencial, ya que el desplazamiento en fase es relativo a la fase correspondiente al último símbolo transmitido, en vez de ser relativo a algún valor constante de referencia. La señal resultante es:

$$s(t) = \begin{cases} A \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot t + \pi); & 1 \text{ binario} \\ A \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot t); & 0 \text{ binario} \end{cases}$$

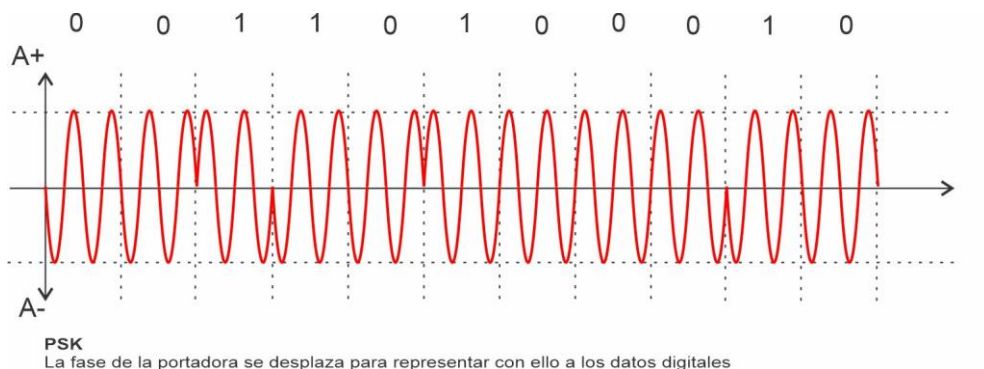
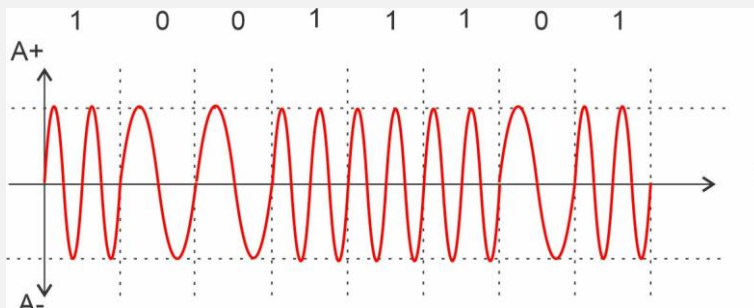


Fig. 13. Modulación PSK.

Ejemplo 5. Dada la cadena de bits 10011101 y una portadora f_c , representar gráficamente la forma de onda resultante de la modulación FSK. Expresar analíticamente la señal resultante $s(t)$ de la modulación.

En FSK (Fig. 12), los dos valores binarios se representan mediante dos frecuencias diferentes próximas a la frecuencia de la portadora.



La señal resultante es:

$$s(t) = \begin{cases} A \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot t) ; 1 \text{ binario} \\ A \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_2 \cdot t) ; 0 \text{ binario} \end{cases}$$

Ejemplo 6. Un modem utiliza FSK en una transmisión full-duplex en una línea de calidad telefónica con un ancho de banda de 3400 Hz. Para transmitir, el ancho de banda se divide en torno a los 1700 Hz. En uno de los sentidos, las frecuencias utilizadas para representar los dígitos binarios 1 y 0 están centradas en torno a una portadora $f_c = 1170 \text{ Hz}$ desplazándose 100 Hz a cada lado respectivamente. Determinar las frecuencias f_1 y f_2 .

En FSK, f_1 y f_2 corresponden a desplazamientos de la frecuencia portadora f_c , de igual magnitud pero en sentidos opuesto.

Para representar el 1 binario, la portadora se desplaza 100 Hz a la derecha, resulta $f_1 = 1270 \text{ Hz}$. Para representar el 0 binario, la portadora se desplaza 100 Hz a la izquierda, resulta $f_2 = 1070 \text{ Hz}$.

Bibliografía recomendada

- [1] David Luis La Red Martínez. Presentaciones de Clases Teóricas. Comunicaciones de Datos, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura. Universidad Nacional del Nordeste.
- [2] W. Stallings. *Comunicaciones y Redes de Computadoras*, 6ta. Edición. Prentice Hall, Madrid, 2000.