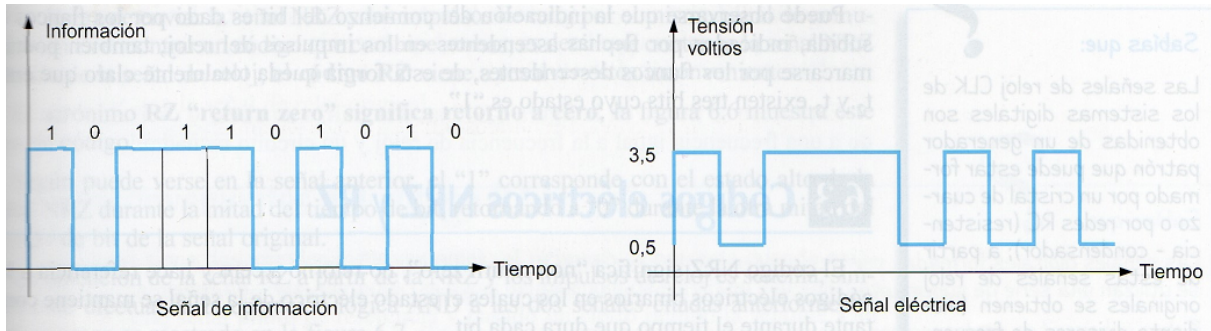


## 6.- Transmisión Digital

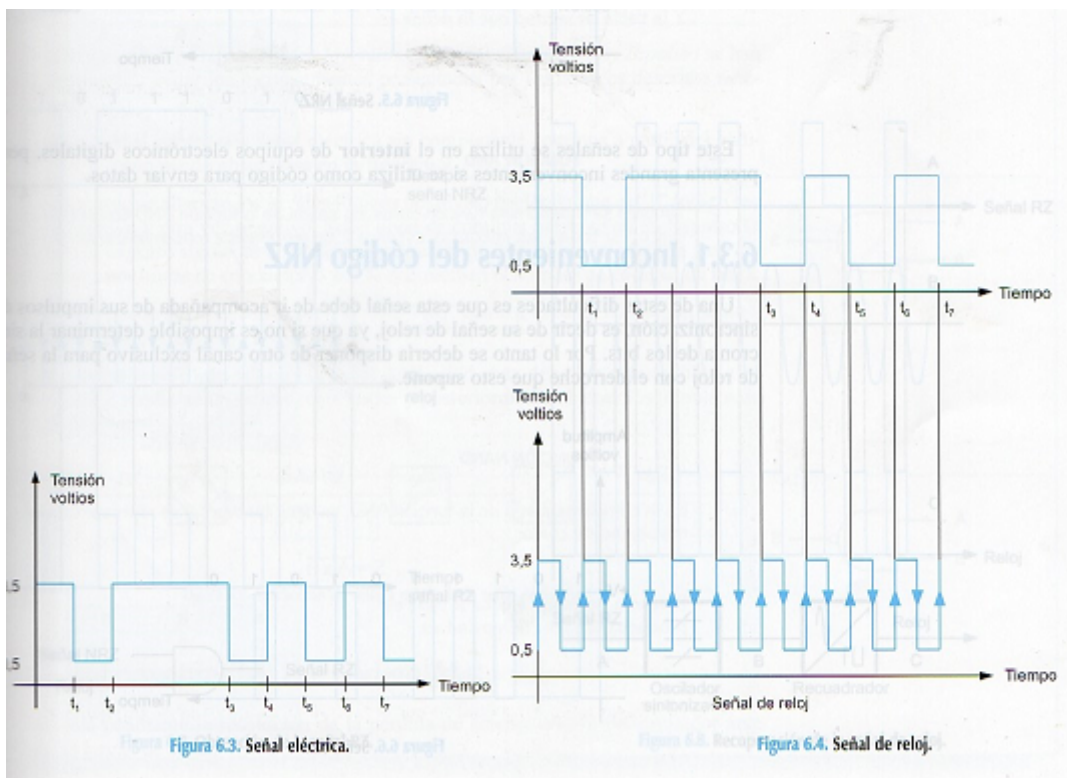
Las señales digitales consisten en sucesiones de 0 y 1 que pueden representarse en forma de pulsos que tienen su equivalente eléctrico, tal como se muestra en las siguientes figuras, donde el 0 equivale a una tensión eléctrica de 0,5 voltios como máximo, y el 1 equivale a una tensión eléctrica entre los 3,5 y 5 voltios.



El inconveniente de transmitir este tipo de señales es que no pueden ser decodificadas de forma clara porque no podemos establecer si en cierto período de tiempo hay un pulso o mas, esto es, un sólo 1 lógico o más.

Es necesario disponer de cierta información adicional que nos precise dónde empieza y acaba cada uno de los bits.

Para ello utilizamos una señal de temporización o **señal de reloj**, la cual establece los tiempos de cada bit, tal como vemos en la figura siguiente.



Observamos que el comienzo de cada bit viene indicado por los flancos de subida de los impulsos de reloj.

### Codificación de Línea.-

Una vez que hemos convertido la señal original a una sucesión de ceros y unos, es preciso representar esta sucesión en formas de onda específicas, lo cual denominamos **codificación de línea**, que según su formato pueden tener parámetros y características distintas, tales como potencia de transmisión, ancho de banda, facilidad o no en recuperar la señal de reloj, posibilidad de detección y corrección de errores, etc.

Si todos los elementos de la señal tienen el mismo signo, es decir, son todos pulsos positivos o todos negativos, la señal se dice que es **Unipolar**.

En una señal **Polar**, cada estado lógico se representa mediante un nivel positivo de tensión y el otro mediante un nivel negativo, por ejemplo positivo para un "1" y negativo para un "0". La codificación RZ, NRZ, y Bifase, emplean señales polares.

En una señal **Bipolar**, se utilizan 3 niveles. El estado lógico "1" se codifica alternativamente como un pulso positivo y negativo. Es decir, si el primer "1" es positivo, el segundo será negativo, el tercero positivo, etc. aunque no sean consecutivos. En cambio el estado lógico "0" se representa como voltaje 0. La codificación AMI y HDB3, emplean señales bipolares.

### Código RZ (Retorno a Cero).-

La señal que representa a cada bit retorna a cero en algún instante dentro del tiempo del intervalo de bit. Esto presenta una ventaja en el caso de tener secuencias largas de "unos" o de "ceros".

No es necesario enviar una señal de reloj adicional a los datos.

Los códigos de "retorno a cero" RZ trabajan con impulsos estrechos de menor duración que el intervalo de bit. El ciclo de trabajo es el parámetro que mide la anchura del impulso RZ. Se define como la relación porcentual entre la duración de los impulsos y el tiempo del intervalo de bit.

Utilizan generalmente un ciclo de trabajo de 50 %.



La codificación RZ tiene el inconveniente de utilizar el doble de ancho de banda para conseguir transmitir la misma información que los códigos NRZ.

Por otra parte, esta codificación tiene cierto componente de c.c. Por lo que no es demasiado conveniente para la transmisión por una línea de conductores paralelos (aparición de componentes capacitivos e inductivos, rechazo de los transformadores al paso de la c.c. etc).

Además, si aparecen secuencias largas de ceros seguidos (ausencia de señal) el oscilador pierde la señal de referencia.

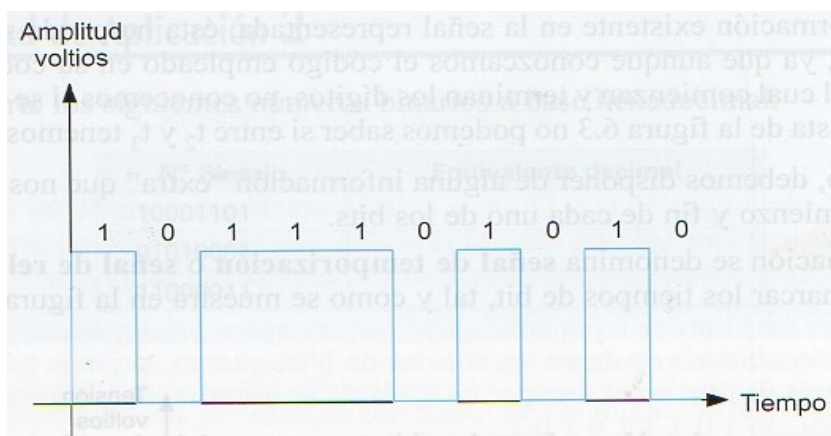
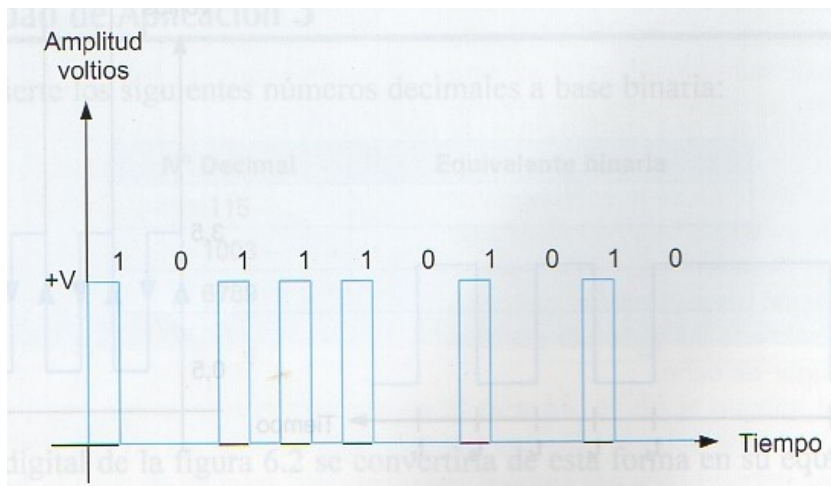
### **Código NRZ (No Retorno a Cero).-**

El estado eléctrico de la señal se mantiene constante durante el tiempo que dura cada bit, esto es, si aparece una secuencia larga de "unos" la señal eléctrica no baja a cero entre un bit y el siguiente.

Esto tiene como inconveniente que es difícil precisar dónde acaba un bit y dónde empieza el siguiente, por lo que se necesita una señal de reloj que sincronice los bits en cada flanco de subida.

Esto implica disponer de otro canal exclusivo para transmitir la señal de reloj.

En los gráficos siguientes se muestra la diferencia entre el código RZ (primera gráfica) y el NRZ (segunda gráfica) para transmitir la misma secuencia binaria.



La conversión del código NRZ al RZ es bastante sencilla pues consiste simplemente en una operación AND entre la señal NRZ y la señal de reloj, tal como podemos comprobar en la parte izquierda del gráfico siguiente.

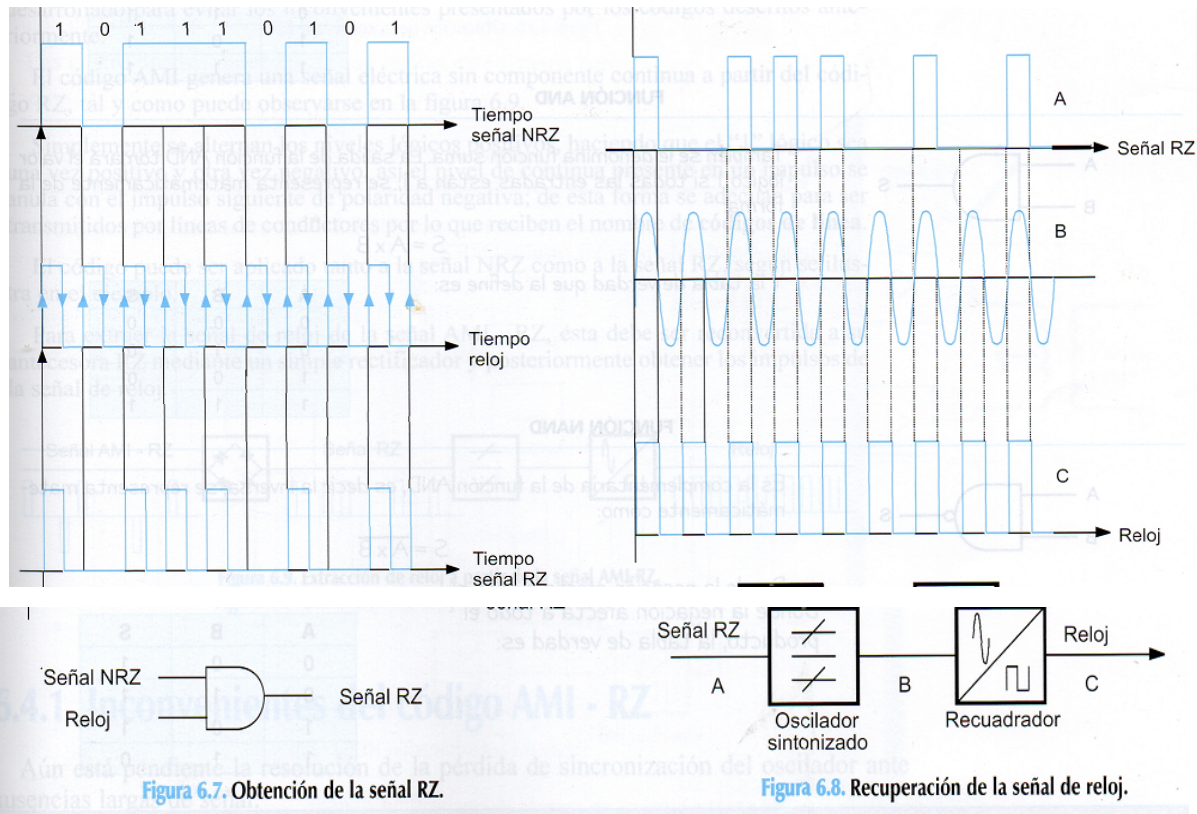


Figura 6.7. Obtención de la señal RZ.

Figura 6.8. Recuperación de la señal de reloj.

Una vez transmitido el código, es preciso recuperar o separar la señal de reloj. Esto se realiza utilizando un circuito oscilador sintonizado a la frecuencia del reloj, el cual genera el equivalente a la señal de reloj pero en forma sinusoidal. Utilizando luego un circuito recuadrador obtendríamos la señal de pulsos original, tal como podemos ver en la parte derecha del gráfico anterior.

### Códigos BIFASE.-

La señal cambia en medio del intervalo del bit sin retornar a cero, continuando el resto del intervalo en el polo opuesto. Esta transición se utiliza como método de sincronización.

Existen dos variantes: código Manchester y Manchester Diferencial.

### Código Manchester.-

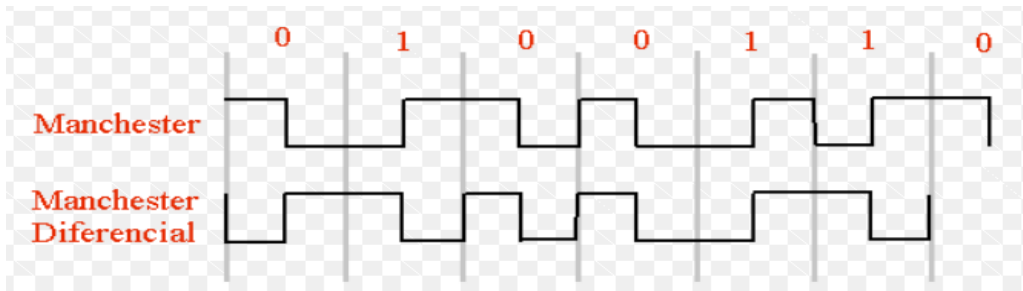
El cero lógico se representa como una transición del polo positivo a negativo, o bien de nivel alto a bajo, y el uno lógico se representa como una transición del polo negativo al positivo o del nivel bajo a alto.

### Código Manchester Diferencial.-

En el cero lógico se transiciona de nivel alto a bajo al principio de la duración del bit, de forma que la señal realiza dos cambios de nivel (el segundo es para la sincronización), mientras que el uno lógico no presenta transición al principio del bit, de forma que la señal solo presenta un cambio de nivel al final del bit.

En la siguiente figura se muestra un ejemplo comparativo de los dos códigos de Manchester.





A continuación analizaremos dos codificaciones bipolares: el AMI y el HDB3.

### Códigos AMI (Alternate Mark Inversion).-

Solucionan los inconvenientes de los códigos RZ y NRZ.

Consiste en alternar los niveles lógicos positivos, haciendo que el "1" lógico sea una vez positivo y a la siguiente negativo. De esta forma el nivel de c.c. que pueda aparecer en un pulso positivo queda anulado por el que aparece en el siguiente pulso negativo. Esto hace que este tipo de codificación sea muy apropiada para la transmisión a través de líneas de par de conductores.

El código AMI genera una señal eléctrica sin componente continua a partir del código RZ, o del NRZ, tal como podemos apreciar en la siguiente figura.

**(Nota: El cronograma se corresponde con la señal 101100101 en vez de la 101110101).**

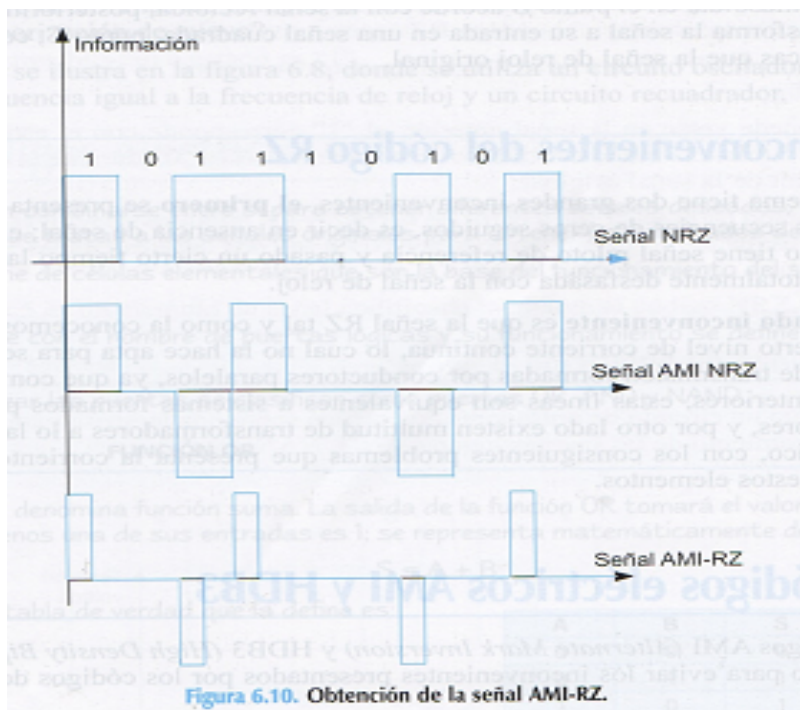
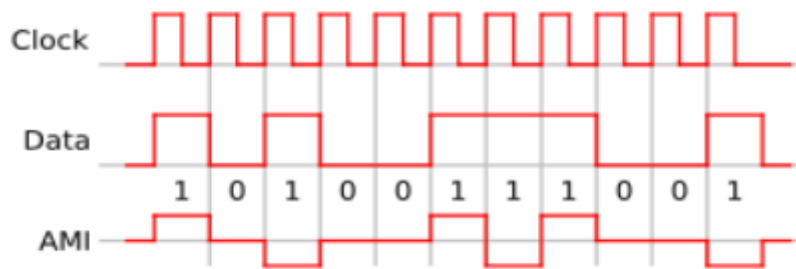
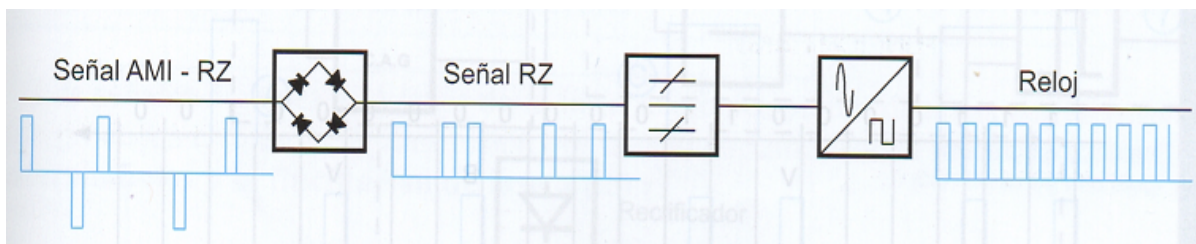


Figura 6.10. Obtención de la señal AMI-RZ.

A continuación podemos ver otro cronograma de ejemplo de codificación AMI.



Para extraer la señal de reloj de la señal AMI-RZ, ésta debe ser reconvertida a RZ mediante un simple puente rectificador, y en una etapa posterior se obtienen los pulsos de la señal de reloj, tal como podemos observar en la siguiente figura.

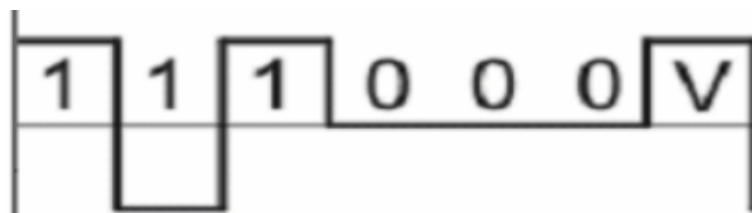


### Codificación HDB3 (High Density Bipolar -3 Zeros).-

El 1 lógico se representa con pulsos de polaridad alternativa (+ y -), mientras que un 0 lógico toma el valor 0.

Cuando aparecen secuencias de muchos ceros seguidos se puede perder el sincronismo al no poder distinguir un bit de los adyacentes. Para evitar esta situación cuando aparecen cadenas de 4 bits consecutivos de ceros, se sustituye el último 0 por un bit de valor 1 (+ o -) denominado de **violación del código**.

En la secuencia 1110000 tenemos 4 ceros seguidos, por lo que el último 0 lo sustituimos por 1.

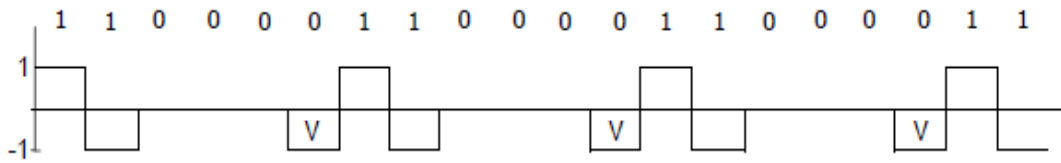


El receptor debe ser capaz de interpretar este 1 como 0, por lo que debemos diferenciarlo de alguna manera de los otros pulsos "1".

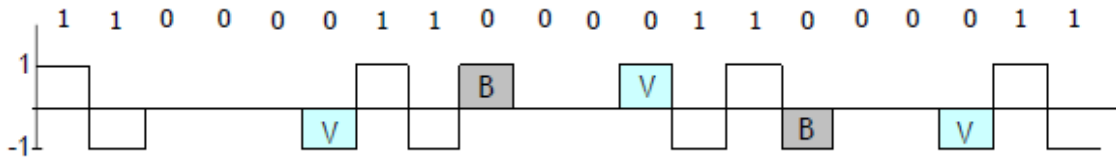
De esta forma, el cuarto pulso que era cero va a tomar la misma polaridad del pulso "1" que le precede. El pulso "V" viola el código, pues tenemos dos pulsos "1" que no alternan su polaridad, siendo fácilmente detectable por el receptor.

Para mantener la componente de c.c. con valor cero, se han de realizar alternativamente tantas violaciones de código positivas como negativas. Para ello en ciertas ocasiones es preciso insertar un pulso "B" de relleno.

Supongamos la siguiente secuencia, donde tenemos varias violaciones de código.



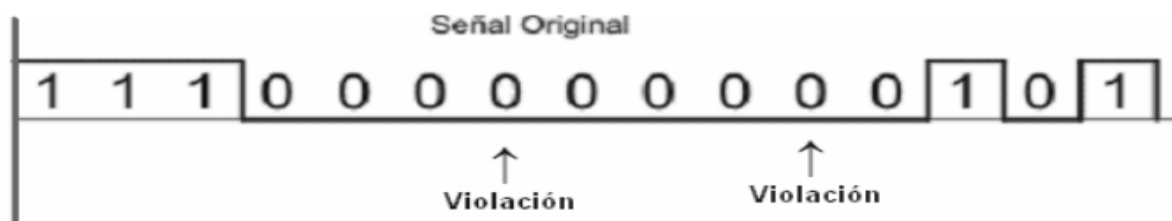
Vemos que existe un desequilibrio entre pulsos positivos (4) y negativos (7). Para evitarlo, debemos utilizar las secuencias que insertan pulsos de relleno o balance (B) alternando violaciones positivas y negativas.



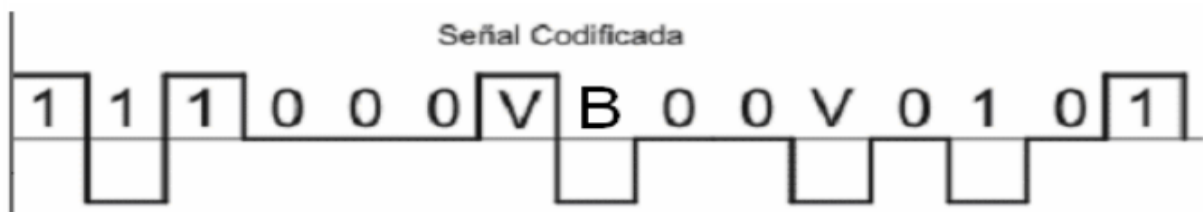
Las reglas para codificar en HDB3 son las siguientes:

- Cuando aparecen más de tres ceros consecutivos, estos se agrupan de 4 en 4, y se sustituye cada grupo de cuatro ceros por la secuencia B00V, o por 000V.
- B indica un pulso de signo inverso al pulso anterior (para alternar la polaridad de los pulsos), mientras que V indica un pulso del mismo signo que el pulso anterior, lo cual nos permite detectar la violación del código.
- Para decidir cuál de las dos secuencias se debe de utilizar, debemos contar la cantidad de unos existentes entre la última violación y la actual. Si la cantidad es **par** se emplea la secuencia B00V, y si es **impar** la secuencia 000V.
- En la combinación B00V el bit V y el B tienen la **misma polaridad**.

Ejemplo 1:



Sustituimos los 4 primeros ceros por la secuencia 000V (hay un número impar de 1 antes), y los cuatro siguientes por B00V.



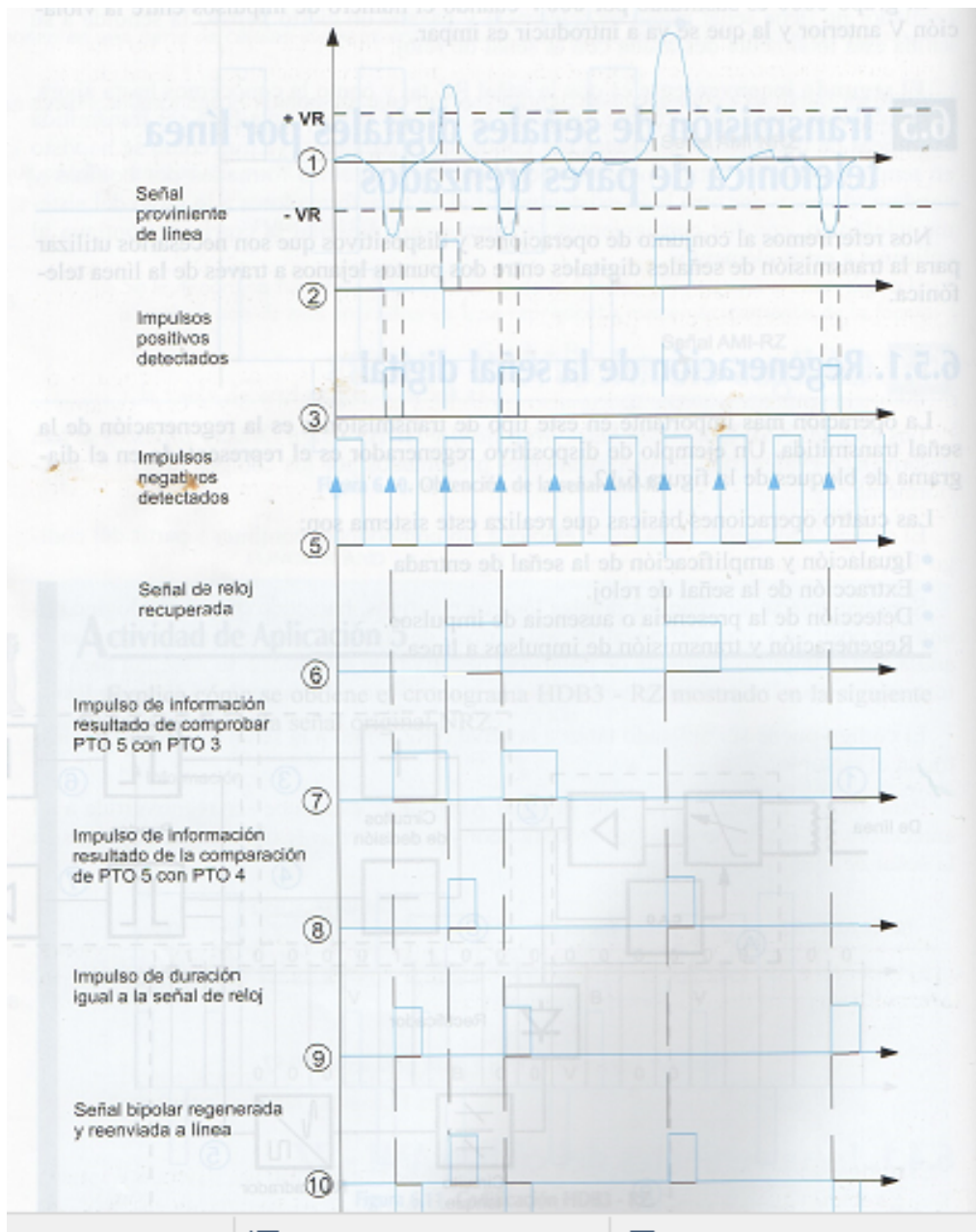




- Igualación y amplificación de la señal de entrada.
- Extracción de la señal de reloj.
- Detección de la presencia o ausencia de pulsos.
- Regeneración y transmisión de pulsos.

La señal digital transmitida por la línea telefónica se va deformando por el efecto de las perturbaciones que influyen sobre el medio de transmisión. Es necesario restaurar los pulsos originales mediante un circuito regenerador, tal como se mostró en la figura anterior.

En la siguiente figura podemos analizar por etapas las señales presentes en cada uno de los módulos del circuito regenerador.



La señal a la entrada del circuito viene representada en el punto 1 de la

gráfica. Podemos observar que los pulsos no tienen la misma amplitud, por lo tanto el primer paso será igualarlos por medio del bloque A del circuito.

A la salida de esta etapa, la señal es llevada a dos bloques diferentes, por una parte, el bloque B que contiene un circuito que recupera la señal de reloj, y por otro el bloque C que contiene el circuito detector de presencia o ausencia de pulsos.

El bloque B recibe la señal igualada, la rectifica, y mediante un circuito oscilador LC sintonizado a la frecuencia del reloj, obtiene a la salida una señal sinusoidal. Este circuito es capaz de seguir generando una señal de salida aunque no exista señal a la entrada (0 lógico) durante cierto periodo de tiempo, por este motivo es importante que no existan grandes secuencias de ceros seguidas.

A partir de la señal sinusoidal, y mediante el circuito recuadrador, se obtiene una señal cuadrada (punto 5) con la misma frecuencia que la señal de reloj. Esta señal está un poco desfasada con respecto a la señal original debido al tiempo que tarda en recorrer la línea de transmisión y a las distorsiones que en ésta se producen.

Los circuitos de decisión que forman el bloque C deciden si hay o no pulsos, comparando la señal a su entrada con un nivel de referencia  $+V_r$  y  $-V_r$ , obteniendo a su salida los pulsos positivos del punto 3 y por otro los negativos del punto 4.

El bloque D se encarga de determinar si existen pulsos de información o no, comparando los pulsos que llegan a los puntos 3 y 4, con los pulsos de reloj del punto 5. Al final se generan pulsos cuadrados de la misma duración que la señal de reloj, tal como se muestra en los puntos 8 y 9.

Estos forman la señal bipolar presente en el punto 10 que es reenviada por la línea de transmisión.

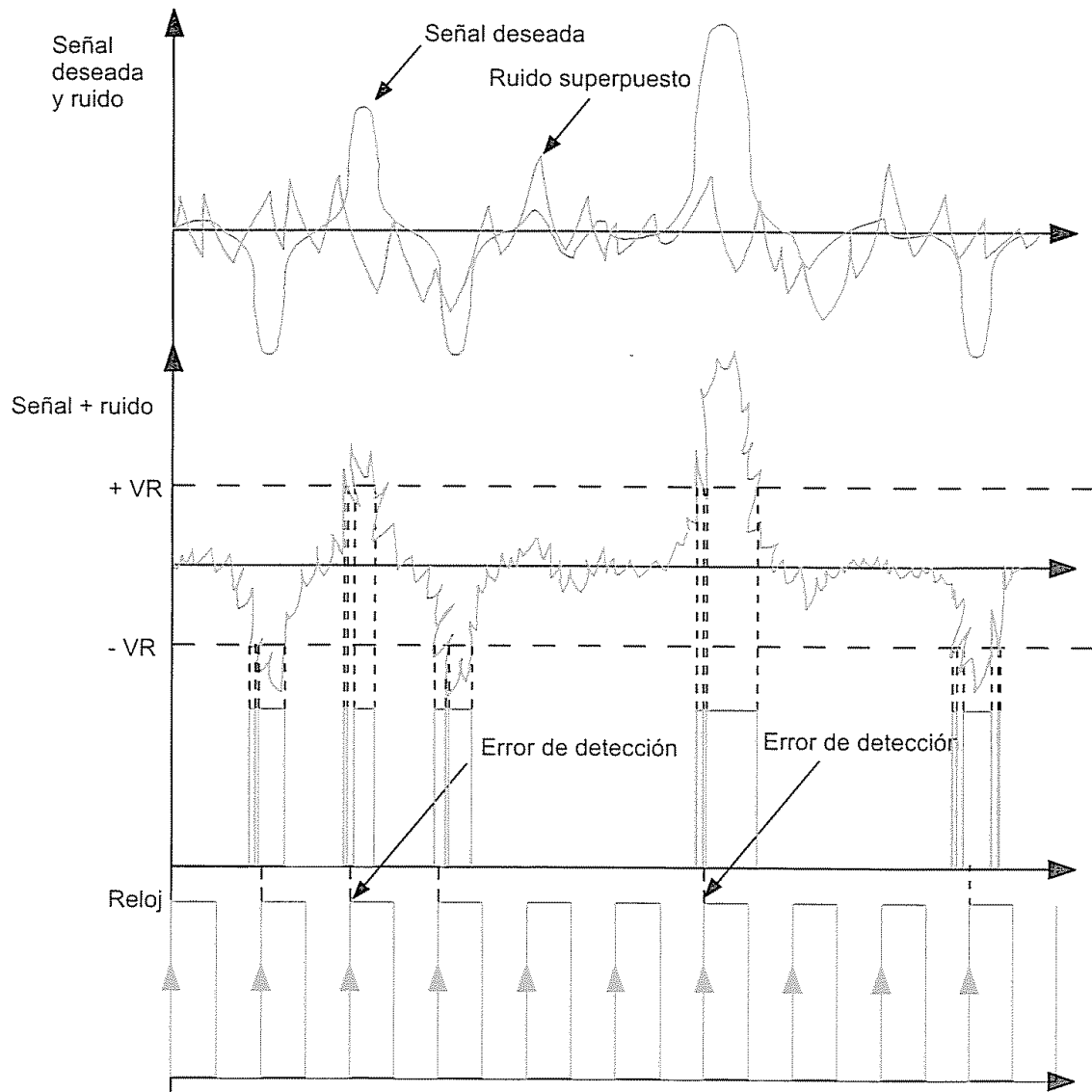
### **Perturbaciones más frecuentes de las señales digitales.-**

Las señales digitales a lo largo de una línea telefónica sufren distintas perturbaciones que producen errores en la transmisión. Las más importantes son el ruido, la distorsión intersímbolos, y la fluctuación de fase (jitter).

#### **El Ruido.-**

El ruido está presente en todas las transmisiones de señales. En los sistemas digitales es un problema que puede eliminarse más fácilmente que en los sistemas analógicos, pero pueden producir que los pulsos no sean detectados en los circuitos regeneradores.



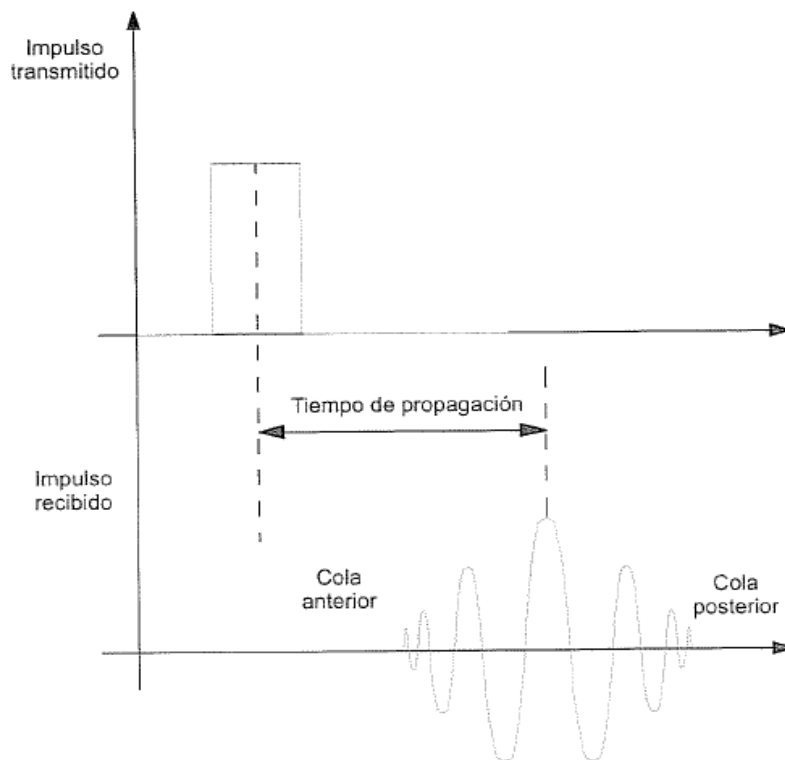


### **Distorsión Intersímbolos.-**

Se produce en todas las transmisiones de señales digitales eléctricas, ya que se debe a la limitación del ancho de banda empleado.

Para transmitir una señal digital, al ser esta una señal cuadrada, necesitamos un ancho de banda muy grande, debido a la gran cantidad de frecuencias que componen estos tipos de señal, que son suma de múltiples señales sinusoidales puras.

Cuando el sistema no dispone del ancho de banda suficiente, se produce un fenómeno denominado "colas" del pulso, tal como se muestra en la siguiente figura.

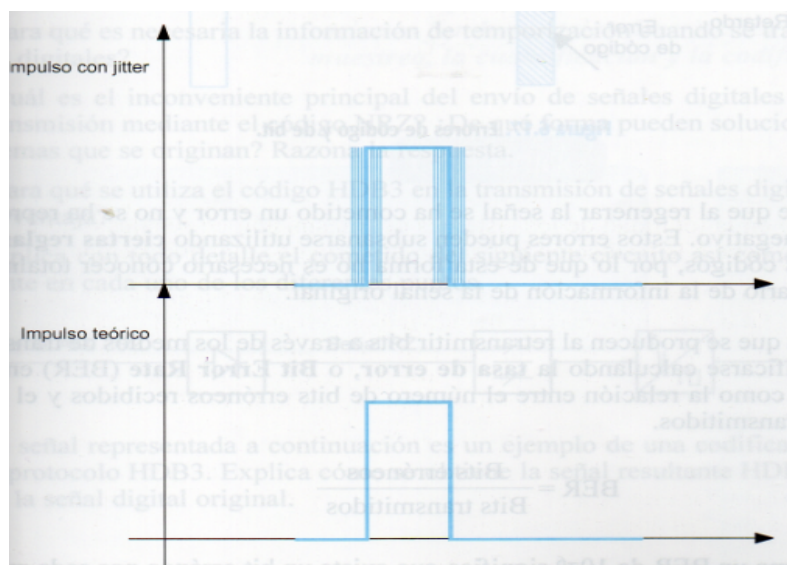


Puede observarse que la cola anterior y posterior pueden interferir con los pulsos adyacentes. Para evitarlo, los pulsos deben estar lo suficientemente separados para que no sean interferidos. Cumpliendo esta condición no tendremos distorsión intersímbolos.

Por otra parte, este tipo de error es una de las causas de la limitación de velocidad de transferencia de datos en los sistemas digitales.

### Fluctuación de Fase (Jitter).-

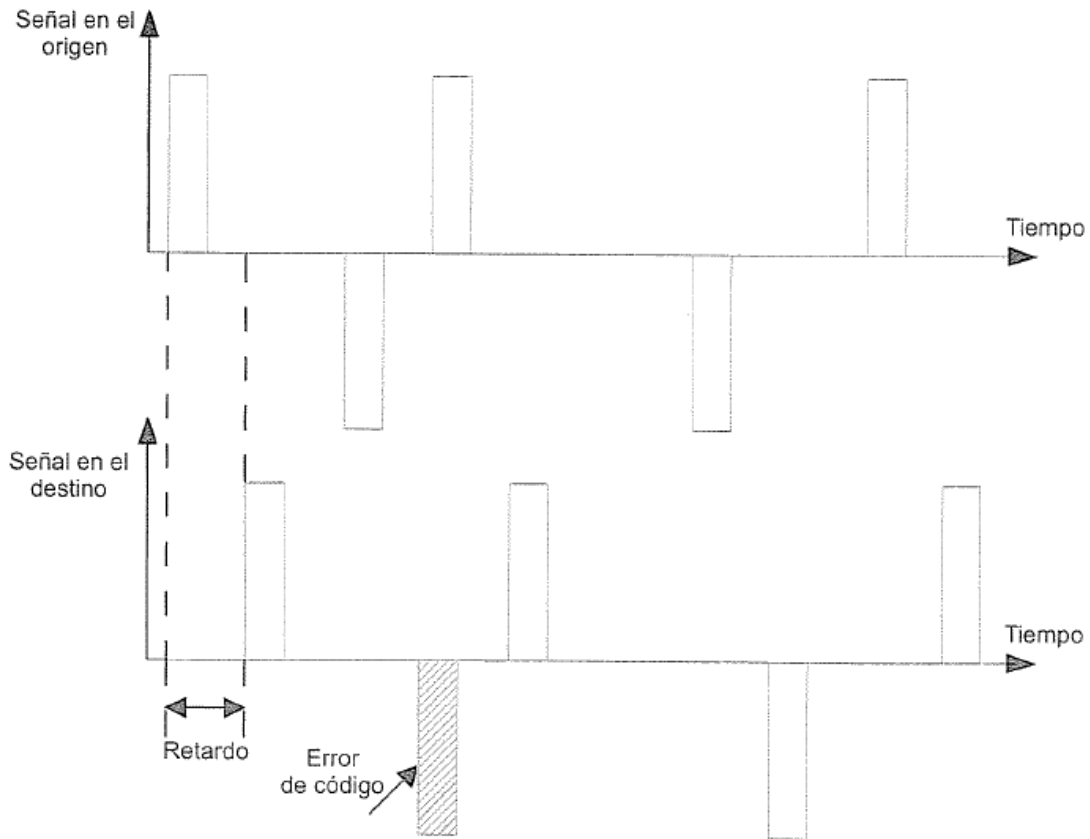
Implica una variación de los frentes anteriores y posteriores de los pulsos con relación a los que deberían ocupar en el mismo tiempo, tal como apreciamos en la siguiente figura, donde tenemos un pulso con "jitter".





### Errores de Código. Medida de la tasa BER.

Se produce cuando la señal al final de la línea contiene una alteración del código que está utilizando. Así por ejemplo, en la siguiente figura tenemos la señal en el origen y en el final de la transmisión, utilizando el código HDB3-RZ.



Como puede apreciarse, al regenerar la señal se ha producido un error y no se ha reproducido el primer bit negativo. Estos errores se pueden subsanar utilizando ciertas reglas o protocolos en los códigos.

Los errores que se producen al transmitir señales binarias a través de los medios de transmisión pueden cuantificarse calculando la tasa de error (Bit Error Rate) o BER, que puede definirse como la relación entre el número de bits erróneos recibidos y el número total de bits transmitidos, esto es:

$$\text{BER} = \frac{\text{Bits erróneos}}{\text{Bits transmitidos}}$$

Así por ejemplo, un BER de  $10^{-6}$  significaría que existe un bit erróneo por cada millón de bits transmitidos.

Los valores habituales de BER según el medio físico de transmisión son los siguientes:

- BER <  $10^{-12}$  Fibra óptica
- BER <  $10^{-8}$  Cobre
- BER <  $10^{-5}$  Enlaces telefónicos, satélite, ADSL
- BER  $\geq 10^{-5}$  GSM (Global System for Mobile)

### Resumen Comparativo de los tipos de Codificación.

