

Este artículo complementa y culmina el presentado en la revista N°253 dedicado a los principios fundamentales del procesamiento del Audio Digital, un tema, sin duda, vital ya que actualmente la práctica totalidad de los sistemas registran los sonidos de forma digital.

FUNDAMENTOS DE AUDIO DIGITAL II



8. CORRECCIÓN DE ERRORES

En audio convencional, la protección contra el ruido que se incluye en los medios de grabación y reproducción es sumamente limitada. En audio digital la señal no se encuentra exenta de ruidos, que pueden ser producidos por el polvo, los arañazos y las huellas dactilares presentes en la superficie del compact disc. Sin embargo, existen numerosas alternativas que nos permiten disminuir, hasta prácticamente eliminar, el ruido del medio de grabación.

En la señal PCM (Modulación por Pulsos Codificados), el efecto de un solo bit erróneo depende del peso

de dicho bit. Efectivamente, si el bit menos significativo (LSB) de una palabra resulta equivocado, el efecto producido se perderá en el ruido. Por el contrario, si el bit más significativo (MSB) de una palabra resulta erróneo, se generará un transitorio importante que se sumará al sonido, creando una interferencia sobre éste que podría llegar a notarse.

Luego podemos afirmar que en audio digital se puede producir una alteración del valor numérico que contiene los datos. A esta alteración de los datos es lo que en los sistemas digitales se conoce como error.



9. SISTEMAS DE PROTECCIÓN CONTRA ERRORES

En el transcurso de los procesos PCM o de modulación de señales por codificación de pulso pueden producirse distorsiones de corta duración cuando se reproduce un estado binario diferente al que se grabó. Para evitarlo, se usan los sistemas de protección y corrección de errores.

Los sistemas de protección contra errores utilizados en audio digital tienen como fin detectar el error introducido en la información, corregirlo y, en el peor de los casos, si es imposible corregir total o parcialmente la información, tomar una decisión para encubrir los datos. Si la información perdida es demasiado grande, la única solución es enmudecer esta información.

Actualmente, para los sistemas digitales de información se han desarrollado varios sistemas de protección contra errores, entre los que tenemos:

- Repetición simple.
- Bits de paridad.
- CRCC (*Cyclic Redundancy Check Code*), código de chequeo por redundancia cíclica.
- CIRC (*Cross Interleave Read-Solomon Code*), código Solomon de lectura entrelazada cruzada.

De estos sistemas vamos a estudiar los dos primeros, que refunden la idea general de los demás sistemas, ya que los dos últimos utilizan operaciones matemáticas bastante complejas. Todos los sistemas enumerados se emplean en el formato de compact disc.

El sistema de repetición simple es muy básico. Consiste en *repetir los datos un número determinado de veces, lo que denominamos redundancia*. Este sistema se basa en que, al detectar un error, el sistema podría corregirlo a partir de los datos redundantes que hayan pa-

sado sin alteración, comparándolos y detectando la diferencia con el dato que le corresponde como pareja. Sin embargo, no se puede hacer la corrección, porque no hay manera de saber cuál de las dos informaciones de la pareja es la correcta al proceder a compararlas. Por ello, cuanto mayor sea el número de repeticiones mejor será la eficacia de corrección de este sistema. Pero introduce limitaciones de espacio en el disco, ya que la asignación de espacio para la información y para la corrección de errores redundantes ha de restarse del espacio útil del soporte de grabación para el almacenamiento de las señales de sonido.

El sistema de detección de errores mediante el bit de paridad, en el que la detección de errores y el proceso de corrección están muy relacionados, por lo que los trataremos conjuntamente mediante este sistema.

El concepto fundamental en la detección de errores es la llamada paridad. Como podemos observar, si queremos proteger una información de cuatro bits, utilizaremos un nuevo bit que añadiremos a esta palabra, de forma que el total de unos en la nueva palabra sea par o impar. El bit añadido a la palabra de cuatro bits no lleva información por sí mismo, ya que necesita de los otros bits de información, por ello se llama bit redundante. Este bit redundante da al mensaje propiedades especiales. Por ejemplo, que el número de unos sea par.

Cuando dicho mensaje sea recibido y carezca de la propiedad especial mencionada con anterioridad

(número de unos par), se habrá producido un error en su transmisión. Si en el mensaje recibido no se ha alterado, probablemente no ha habido error, aunque no podemos estar seguros del todo, ya que la introducción de dos bits de error en la información hace que el mensaje recibido sea correcto y cumpla con la propiedad (número de unos par).

La detección del error se realiza comprobando mediante un circuito detector, formado por puertas OR exclusivas, que el número de unos de cada combinación es siempre par (las citadas puertas darán salida 1 cuando las entradas sean diferentes).

La generación del bit de paridad lo podemos observar en la Figura 15.a mediante un conjunto de puertas OR exclusivas configuradas en lo que se llama árbol de paridad. Igualmente, podemos observar que, de producirse algún error en un bit en la transmisión de la información recibida, no se tendrá un número par de unos. Con este sistema, si se alteran dos bits el error no se detectará.

Cuando se transmiten secuencias de códigos, pueden utilizarse simultáneamente las paridades longitudinales y transversales para detectar la posición correcta del bit erróneo. La Figura 15.b muestra un ejemplo en el que las verificaciones de paridad de ambos sentidos nos dan, en la intersección de la fila y la columna erróneas, la posición del bit alterado. En este ejemplo se utiliza el operador OR exclusivo y, una vez detectada la posición del bit erróneo, la corrección es inmediata, ya que consiste

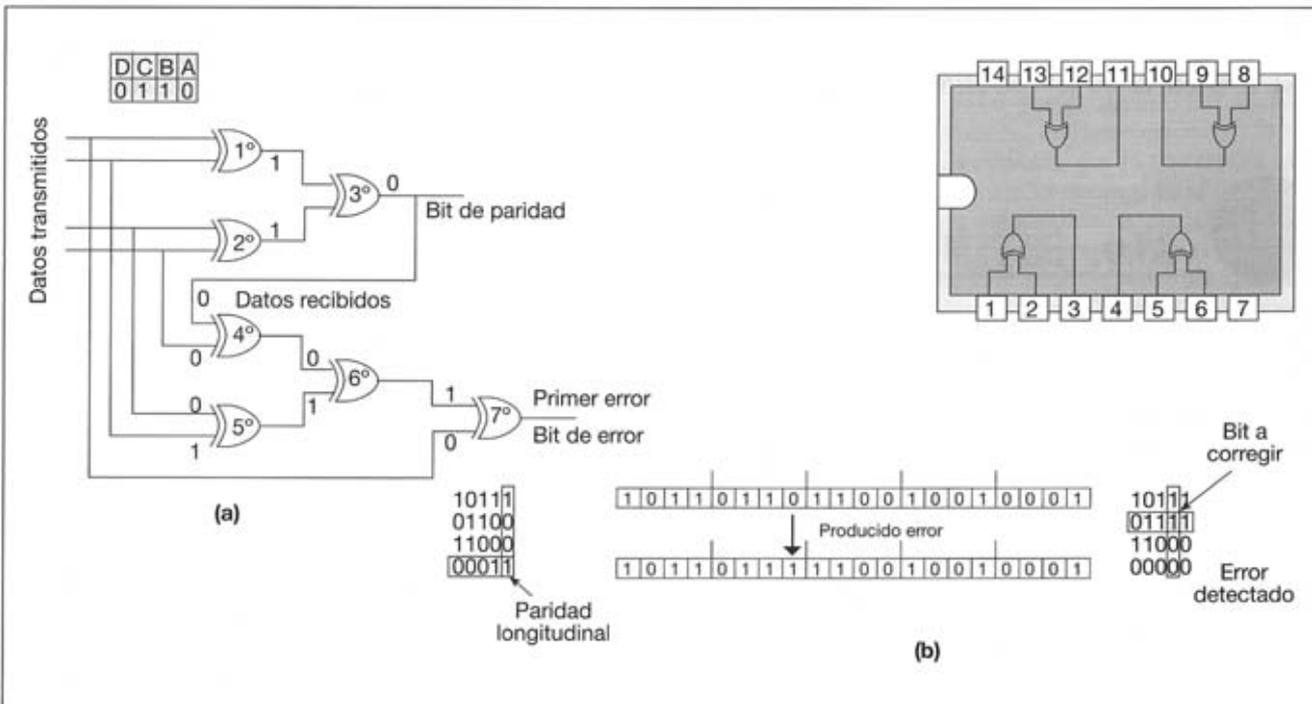


Figura 15. a) Circuito formado por puertas lógicas OR exclusivas. Con ellas se comprueba la paridad añadiendo un número de unos a la palabra. Igualmente, se pueden detectar errores de un bit. b) Sistema de corrección de errores utilizando simultáneamente las paridades longitudinal y transversal.

simplemente en complementar dicho bit. La capacidad de corrección de este sistema incluye, naturalmente, la de error en uno de los propios bits de paridad.

La disposición del número de bits en el sistema de corrección de errores que utiliza las paridades longitudinales y transversales consta de 20 bits en el ejemplo ilustrado, de los cuales 12 son bits de datos, que forman una

palabra de código, a la que se refiere como un código (20,12), en el que hay $20 - 12 = 8$ dígitos redundantes.

Todos los códigos de corrección están más o menos basados en la misma idea de la redundancia. Algunos sistemas, como los llamados códigos de Hamming, emplean sistemas más sofisticados en cuanto a los bits de redundancia.



10. CORRECCIÓN DE ERRORES DE LARGA DURACIÓN

La pérdida de uno o varios bits en los datos recuperados se resuelve en el sistema del disco compacto mediante el método usado para codificar los datos digitales antes de la grabación del disco. Esto permite que cualquier error en la lectura de la señal de un disco compacto, que podría causar distorsión, sea detectado y corregido durante la reproducción. Un código muy potente de corrección de error múltiple llamado *Cross Interlave Reed-Solomon Code (CIRC, Código de lectura entrelazada cruzada Reed-Solomon)* se emplea para tal fin. Este código se basa en los bits de paridad y en el reagrupamiento en el tiempo de las muestras de audio.

Efectivamente, cuando se producen errores extendidos a un grupo de bits considerable, se producen los errores conocidos con el nombre de error de ráfaga. Cuanto mayor sea la duración del error, más difícil será

corregirlo. Así, el empleo del bit de paridad está limitado por la duración de los errores que puedan producirse, luego este sistema ofrece protección a los errores aleatorios de corta duración.

Existen otros casos, y lamentablemente son los más frecuentes, en los que la cantidad de datos erróneos continuos es tan grande que no es posible hacer la corrección utilizando los sistemas estudiados. Para resolver este problema se ha ideado un procedimiento muy sencillo, llamado transposición o entrelazado (*interleave*) que consideramos en la Figura 16.a, en el que los datos son transpuestos (cambiados de su orden secuencial). Por ello, si en el proceso de grabación o reproducción se perdieran los datos sombreados (como sucede en la Figura 16.b, donde el error de ráfaga producido es grande), al reagruparse los datos nuevamente se convierten en errores más

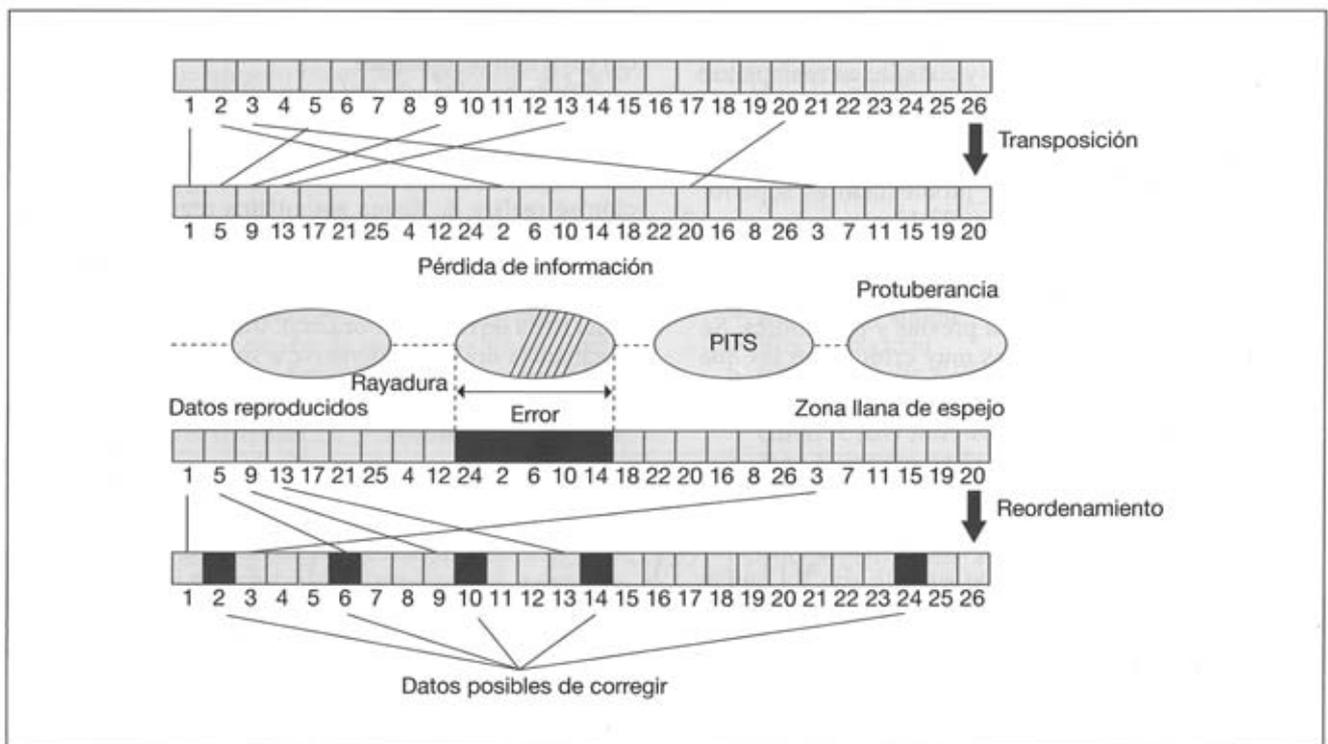


Figura 16. Proceso de transposición y reagrupamiento de datos para corregir el error de ráfaga.

pequeños, repartidos a lo largo de una secuencia de datos.

Este resultado aísla los grupos de errores en bits individuales, de forma que un error de un solo bit puede tratarse igual que un error aleatorio mediante el sistema de control del bit de paridad.

En el transcurso de la reproducción se descompo-

ne la anterior transposición o entrelazado de datos para reconstruir las señales de audio a su forma original.

En estos ejemplos puede observarse la adición de redundancia a los datos reales para formar nuevas palabras de código, que posteriormente van a utilizarse para la detección de errores.



11. OCULTACIÓN DE ERRORES

A continuación vamos a explicar una técnica que evita que los errores de código no corregidos (tras pasar la información digital por el decodificador de CIRC en el reproductor) no afecten a la calidad del sonido. Este método es conocido como ocultación y existen cuatro muy utilizados.

- Silenciamiento (*muting*):** la palabra errónea es silenciada durante una fracción de segundo (puesta a cero). Es un método de ocultación de errores bastante simple (Figura 17.a).
- Mantenimiento de la palabra previa:** como podemos observar, el valor de la palabra anterior a la errónea se mantiene, de forma que no exista diferencia audible. Este método no dará resultados satisfactorios, sobre todo a alta frecuencia (Figura 17.b).
- Interpolación lineal:** este método también se denomina promediado y consiste en reemplazar la palabra errónea por el valor del promedio de la palabra precedente y la posterior, las cuales se suponen que son correctas. La capacidad de compensación de este promediado es superior al método anterior (Figura 17.c).
- Interpolación de alto orden:** es muy parecido al anterior, pero promediando la muestra que falta con más palabras previas y posteriores. Se utiliza en aplicaciones muy críticas, en las que existe una gran pérdida de información.

De una forma muy simple, puede decirse que el código CIRC consta de dos partes: la intercalación de datos, de modo que los *drop-out* o pérdidas de información por defecto físico queden dispersas en un área suficientemente grande que permita reconstruir posteriormente la señal, y un código similar al CIRC para la corrección de errores. Aquí se asume que los errores se presentan en ráfagas como consecuencia del polvo, rayas o imperfecciones en el recubrimiento de aluminio. Los códigos son lo suficientemente potentes como para recuperar un error de ráfaga de más de 4 000 bits consecutivos, equivalentes a unos 2,5 mm sobre el disco. También se puede compensar por interpolación una pérdida de hasta 12 000 bits, que ocupan una longitud de 8,5 mm. Con la implementación completa de corrección de errores (no disponible en todos los reproductores de CD), es posible reproducir sin degradación de audio un disco en el que se haya pegado radialmente una tira adhesiva de aproximadamente unos 2 mm de ancho, o se le haya practicado un orificio de 2 mm de diámetro.

Ahora bien, si tras pasar por el circuito del decodificador se tiene una secuencia de datos erróneos, la interpolación lineal no nos ayudará, por lo que tendrá que intervenir el circuito de borrado *muting*. Esta intervención se realiza de forma automática regulando el nivel de ganancia de un circuito. Dicho proceso se realiza con una antelación de unas 30 muestras, antes de que lleguen las muestras erróneas, ya que la señal es aplicada a una línea de retardo. Por tanto, tras producirse el error, la ganancia del circuito vuelve a su nivel normal, siempre con un intervalo de unas 30 muestras.

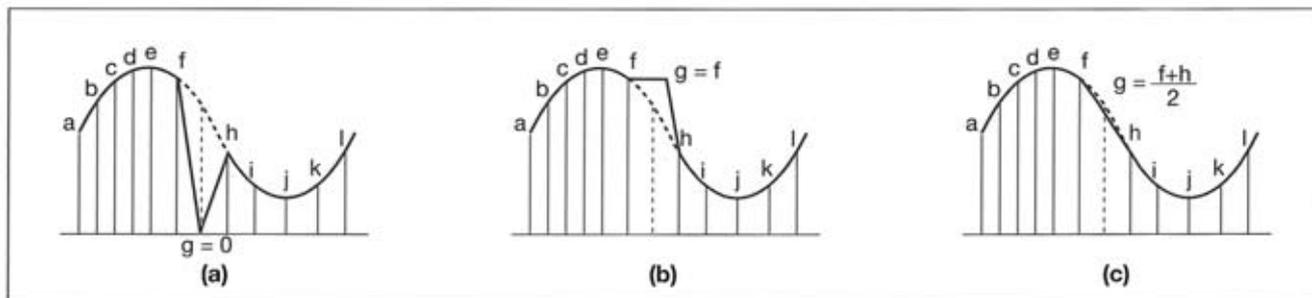


Figura 17. a) Silenciamiento. b) Mantenimiento de la palabra previa. c) Interpolación lineal.



12. SISTEMAS DE MODULACIÓN DIGITAL

Según hemos estudiado, el valor de una muestra cuantificada a la salida del convertidor A/D es una secuencia de unos y ceros. Estos dígitos son símbolos no concretos. Por ello, para representarlos eléctricamente debemos recurrir a un sistema de modulación digital. En el patrón de unos y ceros de la Figura 18 se puede observar que son implementados eléctricamente, usando para ellos variaciones de voltaje. Estas variaciones de voltaje que sufre la muestra tomada pueden ser representadas, entre otras, por las siguientes reglas:

- **Retorno a cero (RZ).** En este sistema los ceros son implementados eléctricamente por niveles de voltaje bajo. Los unos se representan por pulsos de voltaje, con una duración igual a la mitad del tiempo que dura el pulso en este estado de uno (Figura 18.a).
- **No retorno a cero (NRZ).** Este es el sistema más común de modulación. Los ceros son representados por niveles de voltaje bajo mientras que los unos son representados por pulsos de voltaje siempre alto (Figura 18.b).
- **No retorno a cero invertido (NRZI).** Este sistema es el más adecuado para modular eléctricamente las muestras cuantificadas. En él los unos son representados por transiciones que se producen justo a la mitad del tiempo que les corresponde.

En la Figura 18.c podemos observar que si antes de que aparezca 1 tenemos un nivel alto, cuando llega este número, justo a la mitad del tiempo que le corresponde, se pasa a nivel bajo. Lo mismo ocurre si antes de que aparezca 1 tenemos un nivel bajo, en este caso, a la mitad del tiempo que le corresponde, pasará a nivel alto. La sucesión de ceros no produce cambios, luego no se suceden transiciones.

Si esta señal se transfiere directamente al disco, existiría una alta probabilidad de que las transiciones entre unos y ceros se situaran en posiciones contiguas en-

tre sí. Si ello sucediera, el sistema de lectura tendría problemas para distinguir las diferencias entre estos modelos de bits. La distancia se funda en un factor clave del sistema para realizar una lectura precisa de las diferencias entre los bits.

En la Figura 19 podemos observar que entre los métodos de modulación digital considerados, el que más se ajusta a los requerimientos de frecuencia es el NRZI. Sin embargo, este método todavía no es aceptable del todo, pues se producen en él niveles de voltaje constantes que se producen cuando tenemos ceros contiguos o niveles de frecuencia elevados cuando hay pulsos de unos contiguos. Los datos en el formato NRZI no son adecuados para la grabación del disco, puesto que el bit de reloj no se puede recuperar de la secuencia de datos durante la reproducción. Además, la secuencia de datos puede tener componentes de baja frecuencia, que podrían interferir los servos-sistemas del reproductor que controlan el movimiento de rotación del disco y el enfoque y seguimiento del *pickup* láser.

Para mejorar estas deficiencias en el sistema de modulación NRZI, se somete a un proceso previo de codificación en el modulador del canal llamado EFM que describimos a continuación.

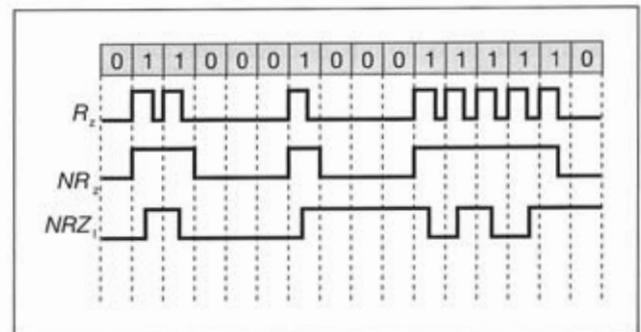


Figura 19. Relación entre la frecuencia y los diferentes sistemas de modulación.

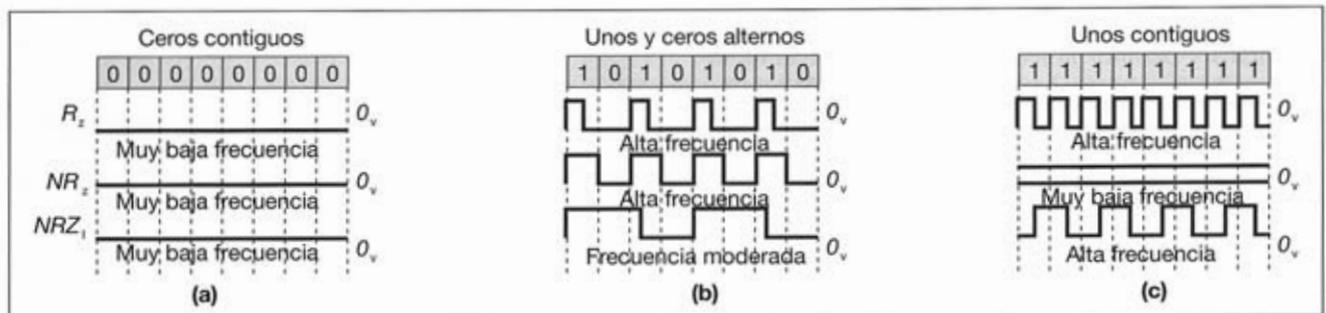


Figura 18. a) Sistema de modulación de retorno a cero (RZ). b) Sistema de modulación de no retorno a cero (NRZ). c) Sistema de modulación de no retorno a cero invertido (NRZI).



13. CODIFICACIÓN EFM (EIGHT TO FOURTEEN MODULATION)

En audio digital se denomina palabra a una muestra compuesta por un grupo de 16 bits procedentes del codificador de corrección de error o de la unidad codificadora de control y presentación. A los subgrupos de ocho bits que salen de dividir una palabra en dos partes iguales los llamaremos símbolos, según podemos observar en la Figura 20.



Figura 20. El formato de una palabra de 16 bits está constituido por dos símbolos de ocho bits cada uno.

Para corregir las deficiencias que todavía persisten en la modulación NRZI, antes de efectuar la modulación digital, a la secuencia binaria de una muestra cuantificada se le convierte a otra secuencia, también binaria. Este proceso de conversión actúa directamente sobre los símbolos que constituyen las muestras. Con ello, cada símbolo de ocho bits es convertido a una secuencia única de 14 bits, acorde a una tabla de codificación preestablecida. Así se asegura que el sincronismo del reloj de bits pueda ser regenerado a partir de los datos (Tabla 1). A esta secuencia de 14 bits la seguiremos denominando símbolo y para que no exista confusión hablaremos del símbolo de ocho y 14 bits.

En definitiva, podemos decir que la codificación realizada convierte los símbolos de ocho bits a símbolos de 14 bits. Por esta razón, a este tipo de codificación se le conoce como modulación de ocho a catorce (del inglés *Eight to Fourteen Modulation*).

Si se pretende que las secuencias de unos y ceros de los símbolos de 14 bits nos resulten útiles y para poder asegurarnos de que el reloj de bits pueda ser regenerado en reproducción a partir de los datos obtenidos por el sistema y permitir la lectura de alta densidad de información, tienen que limitarse las frecuencias de los niveles de voltaje después de que se realice la modulación digital NRZI. Por esta razón, los símbolos de 14 bits deberán cumplir con la siguiente regla: *el número de ceros contiguos no debe ser mayor de 10 entre dos unos, ni menor que dos entre dos unos y no está permitida la existencia de unos contiguos*; a esta regla también se la denomina **regla de dos a diez**.

Estos requisitos previos preestablecidos restringen que el número de ceros contiguos no sea superior a 10, con lo que se evita que aparezcan frecuencias excesivamente bajas que no son apropiadas para el medio de grabación después de la modulación digital. Igualmente, la restricción de que el número de ceros contiguos sea menor que dos y que no aparezcan unos contiguos impide la aparición de frecuencias excesivamente altas. Además, esta restricción es una condición necesaria para la recuperación del sincronismo de lectura de bits que estudiaremos posteriormente.

De las 277 combinaciones posibles eliminamos las 21 configuraciones más perjudiciales, dejándolas para los sincronismos, y utilizamos las 256 combinaciones restantes. Para asignar las 256 combinaciones posibles de los símbolos de ocho bits a las 256 de los símbolos de 14 bits se utiliza la tabla de búsqueda o asignación. La conversión de codificación se realiza fácilmente con un biestable T empleado mediante una tabla almacenada en una memoria ROM (ver Tabla 1 de asignación de símbolos de ocho a 14 bits).

En la Figura 21.a se muestra el proceso de modulación EFM de una palabra de 16 bits correspondiente a una muestra y su posterior modulación digital NRZI. Al final de cada símbolo de 14 bits se han agregado tres bits, llamados bits de acoplamiento o fusión, *merging bits*, que tienen por objeto mantener la regla anteriormente enunciada de 10 a dos en relación al número de unos y ceros, y mantener todos los patrones de 14 T libres de CC. Esto se consigue generando los bits de fusión, de manera que la señal de canal se mantenga la misma cantidad de tiempo en un estado lógico que en el otro. Estos bits no contienen información de audio ni de control y son emitidos por el decodificador.

La combinación establecida para introducir estos bits de acoplamiento depende del símbolo de 14 bits que exista con anterioridad o posterioridad a él. A la señal de voltaje que se produce al final de este proceso se la conoce como señal EFM-NRZI, o simplemente señal EFM o EFMI.

Tabla 1. Tabla de asignación de símbolos de ocho bits a símbolos de 14 bits, donde el número de ceros contiguos no puede ser mayor que 10 ni menor que dos. Tampoco está permitida la existencia de unos contiguos

Parte de la tabla de codificación EFM		
Decimal	Símbolo de ocho bits	Símbolo de 14 bits
101	01100101	00000000100010
109	01101101	00000001000010
120	01111000	01001000000010
122	01111010	10010000000010
126	01111110	00100000000010

La palabra *pits* se utiliza con frecuencia para referirse a las depresiones físicas entre las zonas de espejo y las protuberancias grabadas sobre la superficie del disco. En la Figura 21.b tenemos un ejemplo de una palabra directamente modulada en NRZI, sin codificarse

de ocho a 14, con un contenido irregular de frecuencias (algunas veces muy bajas y otras muy altas). Evidentemente, si la señal se codifica de ocho a 14, su frecuencia es más regular para el proceso electrónico y óptico de lectura de CD.

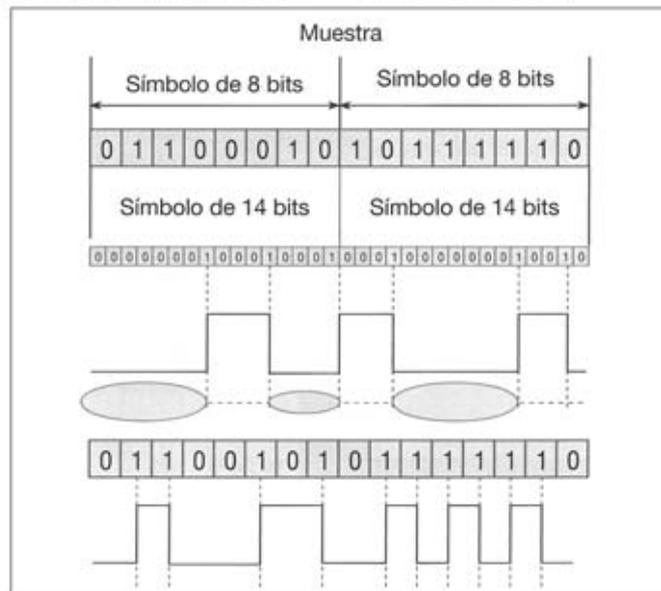
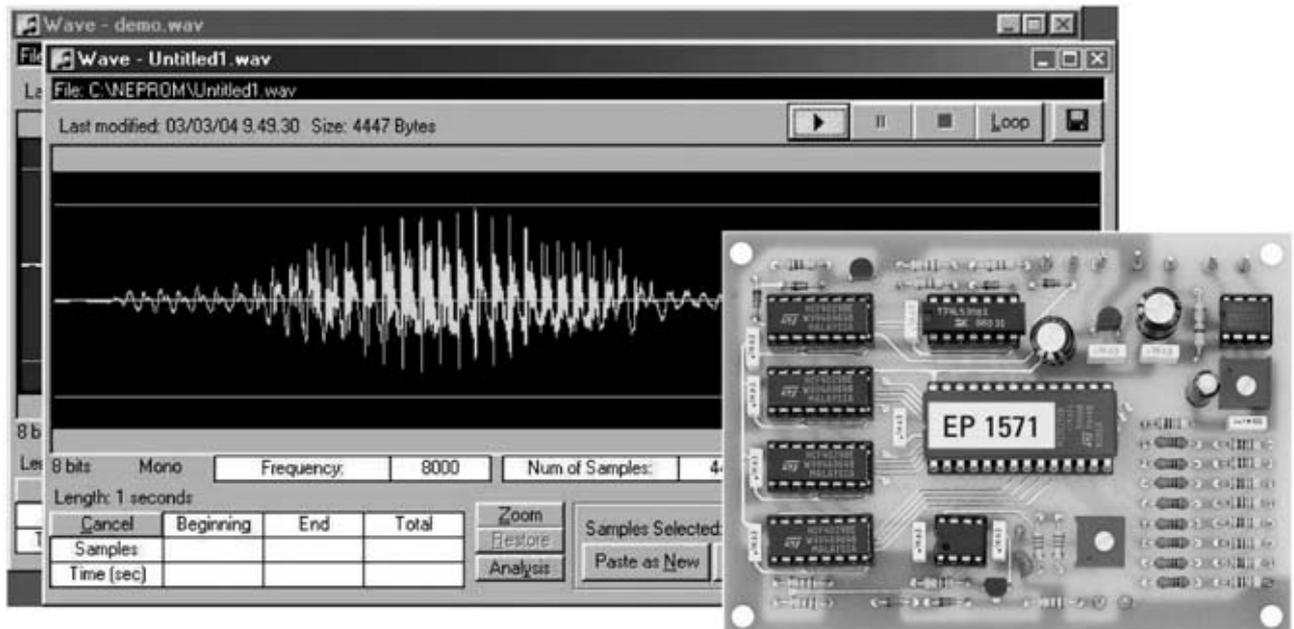


Figura 21. a) Modulación EFM de una palabra de 16 bits y su posterior modulación NRZI. b) Palabra modulada directamente en el sistema NRZI sin producirse la modulación EFM.

La publicación de este artículo ha sido posible gracias a McGRAW HILL/INTERAMERICANA DE ESPAÑA S.A.U. que ha concedido permiso para publicar este extracto de su libro EQUIPOS DE SONIDO y a SONY ESPAÑA S.A., que ha cedido la información contenida en este artículo.



Quienes deseen practicar la grabación y reproducción de sonido digitalizado en EPROM a partir de los sonidos almacenados en un ordenador personal tienen a sus disposición el kit LX.1571, que permite reproducir sonidos grabados en una EPROM 27256, y el Programador para EPROM LX.1574 que incluye todo el software necesario para la grabación y edición del sonido digitalizado (consultar revistas N°239-240)