

Experiencia de laboratorio para la transmisión digital de audio mediante modulación por codificación de pulsos

S. Rodríguez, A. Ayala, B.R. Mendoza, O. González

Dpto. de Física Fundamental, Electrónica y Sistemas

Universidad de La Laguna, ULL

La Laguna, Tenerife, España

srdguezp@ull.es

Resumen—En este trabajo se presenta una experiencia práctica de laboratorio concebida para estudiantes de Ingeniería Electrónica y del Master en Ingeniería Electrónica dentro del proyecto docente de asignaturas relacionadas con Sistemas de Comunicaciones Digitales. El objetivo principal de la experiencia es el diseño e implementación de la electrónica de un sistema de transmisión digital de señales de audio mediante modulación por codificación de pulsos (PCM).

Modulación por codificación de pulsos; transmisión de audio; código Manchester; sincronización

I. INTRODUCCIÓN

Hoy en día los sistemas de comunicación constituyen un sector de rápido crecimiento e importancia dentro del conjunto de la industria. Este hecho queda de manifiesto a través de las diferentes materias que en la actualidad se ofertan como troncales y obligatorias como parte de los planes de estudios de los títulos oficiales que se pueden cursar en las Universidades.

En este trabajo se presenta una experiencia hardware de laboratorio orientada a alumnos que cursan las asignaturas de Sistemas de Comunicaciones II y Sistemas de Comunicaciones Digitales, respectivamente recogidas en los planes de estudios de la titulación de Ingeniero en Electrónica y del Master en Ingeniería Electrónica que se imparten en la Universidad de La Laguna. Dicha experiencia se puede afrontar dentro de una metodología basada en la elaboración de proyectos con grupos formados por tres o cuatro alumnos.

La experiencia consiste en el diseño e implementación de la electrónica de un sistema de transmisión digital de señales de audio basado en la modulación por codificación de pulsos (PCM), que permite al alumno trasladar a la práctica algunos de los siguientes conceptos: acondicionamiento de señal, códigos de línea, muestreo de señales, conversión analógica/digital y digital/analógica, modulación/demodulación y circuitos de sincronización [1, 2]. Durante el desarrollo de la misma, el alumno deberá diseñar y realizar los tres elementos básicos que conforman un sistema de transmisión digital en banda base: el sistema transmisor, el sistema receptor y la electrónica encargada de llevar a cabo el sincronismo de símbolo y de trama, que comparten tanto el sistema transmisor como el receptor.

El sistema transmisor está formado por dos bloques: el bloque de formato, cuya función consiste en proporcionarle un carácter digital a la señal de audio suministrada por un micrófono y su circuito acondicionador, y el modulador, cuya misión es conformar los pulsos que serán enviados al canal. Debido a que la información suministrada por el micrófono y acondicionador tiene carácter analógico, en el bloque de formato se deberá efectuar un proceso de conversión analógica a digital, en el que se ha optado por codificar las muestras de la señal con ocho bits. Con la idea de realizar el sincronismo de trama se ha utilizado uno de los procedimientos más sencillos, insertar una palabra clave antes de cada uno de los ocho bits que conforman el dato propiamente dicho. Además, con el objetivo de facilitar la sincronización de símbolo o de bit, se ha utilizado como código de línea el Manchester, que posee características intrínsecas de reloj.

Al igual que el transmisor, el sistema receptor está compuesto por el bloque de formato y el demodulador PCM, que realizan las funciones inversas a sus homólogos del sistema transmisor. Mientras que el demodulador realiza la decodificación Manchester/NRZ (*Non Return to Zero*), el bloque de formato tiene como misión reconstruir la señal analógica de audio a partir de los símbolos binarios proporcionados por el demodulador, que tras someterla a un proceso de amplificación es aplicada a la entrada de un altavoz.

A continuación se describen el sistema transmisor y receptor PCM, así como el sincronizador de símbolo o de bit, especificando en cada caso los diferentes bloques que los forman.

II. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

En la Fig. 1 se representa el diagrama de un sistema de comunicación digital en banda base para una fuente que proporciona a su salida una señal de tipo analógica [3, 4]. En él se pueden distinguir el bloque de formato, el modulador y demodulador en banda base y, por último, el bloque de sincronización.

El bloque de formato se encarga de proporcionar un formato digital a la información en el caso de que la naturaleza original de la misma no lo sea; aún en caso contrario, si el formato no es adecuado, es en este bloque donde se realizan las transformaciones oportunas para conseguir dicho objetivo. El

modulador en banda base tiene como función dar forma a las señales que irán hacia el canal y que se le asocian a los símbolos que proceden del bloque de formato (dígitos binarios). Al tratarse de un sistema en banda base, la información digital se transmite mediante pulsos con una forma concreta (códigos de línea). En este caso, y con la idea de facilitar la sincronización de símbolo, se ha optado por utilizar como código de línea el *Manchester* o *bi-φ-L* [3]. El bloque de formato y el demodulador en banda base que forman parte del sistema receptor, realizan funciones opuestas a sus homólogos del sistema transmisor.

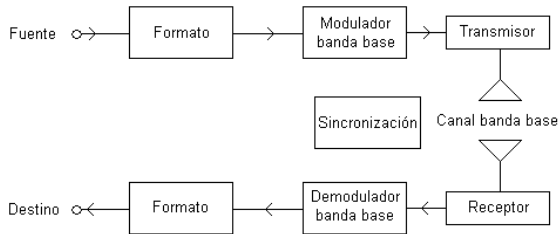


Figura 1. Sistema de comunicación digital en banda base

La sincronización es un elemento que se distribuye a lo largo de todo el sistema. En el transmisor no supone conceptualmente ningún problema, pero en el receptor es uno de los bloques más complejos de realizar. En un sistema de comunicación en banda base son necesarios dos tipos de sincronización, las de símbolo y trama.

A. Sistema Transmisor PCM

En la Fig. 2 se muestra el diagrama de bloques de la fuente y del sistema transmisor especificando los elementos utilizados en la experiencia que aquí se presenta.

Como se puede observar, la fuente está constituida por un micrófono y su circuito acondicionador de señal, que a su vez está compuesto por un filtro paso bajo (filtro antialiasing) y un amplificador basado en el operacional 741. El amplificador de ganancia y *Offset* ajustables, permite adaptar los niveles de

tensión de la señal de audio procedente del micrófono al margen de entrada del conversor analógico/digital, que constituye la entrada del bloque de formato.

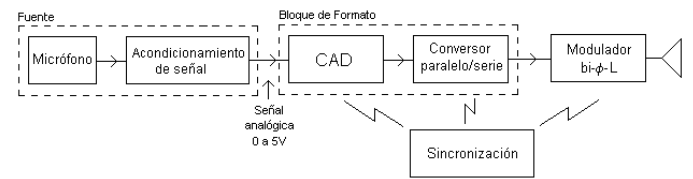


Figura 2. Diagrama de bloques del sistema transmisor y la fuente

El bloque de formato está compuesto por un conversor analógico digital (CAD) y un conversor de paralelo a serie. Para realizar la conversión de analógico a digital se ha utilizado un CAD de ocho bits de resolución de *National Semiconductor*, el circuito integrado ADC0801. Debido a que la transmisión es serie, tras la digitalización es necesario realizar una conversión de paralelo a serie de los ocho bits proporcionados por el conversor para cada una de las muestras de la señal analógica de audio proveniente de la fuente.

Con la idea de establecer el sincronismo de trama, es decir, a partir del flujo de bits de datos que recibe el circuito detector obtener una referencia temporal del comienzo y final de los 8 bits de datos, se ha utilizado uno de los procedimientos más simples, insertar una cabecera o palabra clave al principio de la trama. En definitiva, al canal se enviarán los datos organizados en tramas de 16 bits, donde los ocho primeros corresponden a la cabecera y los restantes a los datos propiamente dichos. Para implementar la conversión de paralelo a serie, e insertar la palabra clave, se han utilizado dos registros de desplazamiento de ocho bits con carga paralela (integrados 74165).

El modulador en banda base tiene como misión conformar los pulsos que serán enviados al canal. Como se ha indicado con anterioridad, y con la idea de facilitar la sincronización de símbolo, se ha optado por conformar los pulsos según se establece en el código de línea *Manchester* o *bi-φ-L*, con niveles de amplitud de $-5V$ y $+5V$.

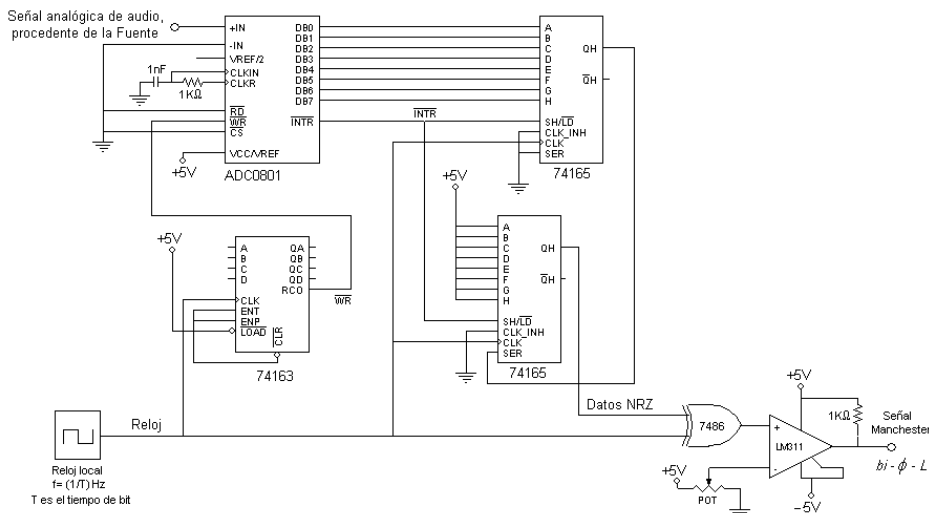


Figura 3. Esquema eléctrico del sistema transmisor

En las Figs. 3 y 4 se muestran, respectivamente, el esquema eléctrico del sistema transmisor y una secuencia temporal de las principales señales que describen su funcionamiento.

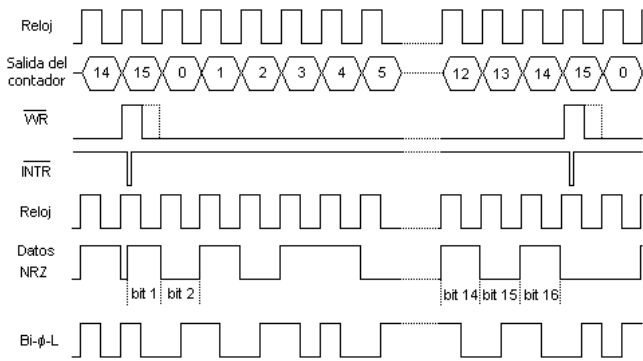


Figura 4. Secuencia de señales relacionadas con el funcionamiento del sistema transmisor

B. Sistema Receptor PCM

En la Fig. 5 se muestra el diagrama de bloques del destino y del sistema receptor implementado en la experiencia práctica que se presenta.

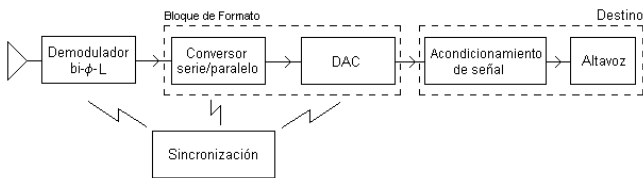


Figura 5. Diagrama de bloques del sistema receptor y del destino

Como se puede observar, el destino está compuesto por un altavoz y su circuito acondicionador de señal, que a su vez está constituido por un filtro paso bajo, similar al filtro antialiasing utilizado en el sistema transmisor, y un amplificador de audio basado en el amplificador de potencia KA386. El bloque de formato y el demodulador realizan las funciones opuestas a sus homólogos del sistema transmisor. El demodulador es el encargado de convertir la señal Manchester en NRZ, mientras

que el bloque de formato tiene como misión reconstruir la señal analógica de audio transmitida a partir de los datos recibidos. En este caso, el bloque de formato está compuesto por un convertor de serie a paralelo y un convertor digital analógico (DAC).

En la Fig. 6 se representa el esquema eléctrico del sistema receptor, donde se pueden distinguir los circuitos encargados de detectar la palabra clave o establecer el sincronismo de trama, los convertidores de serie a paralelo y el convertor digital analógico utilizado, el DAC0808. En este caso, la implementación del circuito de sincronismo de trama se ha basado en la utilización de puertas lógicas AND y de dos registros de desplazamiento de ocho bits con salida paralela (circuitos integrados 74164).

C. Sincronismo de Símbolo

Una parte importante del receptor consiste en la electrónica encargada de realizar el sincronismo de símbolo o de bit. Dicho sincronismo se basa en obtener, a partir de la señal recibida, una señal con forma de onda cuadrada cuyas transiciones indican el instante de comienzo y final del símbolo o bit, es decir, obtener una réplica en fase de la señal de reloj utilizado en el sistema transmisor. Básicamente existen dos tipos de circuitos que se pueden emplear para realizar este tipo de sincronismo: los sincronizadores en lazo abierto y en lazo cerrado. Los primeros obtienen el sincronismo realizando varias operaciones sobre la señal recibida desde el medio de transmisión. Los segundos se basan en comparar una señal de referencia generada internamente con la señal recibida, realizando una medida de la exactitud del sincronismo entre ambas que permite ajustar dicha señal de referencia. En este trabajo, se ha optado por implementar un sincronizador de símbolo en lazo abierto cuyo diagrama de bloques se representa en la Fig. 7.

El filtro paso bajo está diseñado para que presente una frecuencia de corte a -3dB igual a la frecuencia del reloj ($1/T$, donde T representa el tiempo de símbolo o de bit). Su función consiste en eliminar el resto de componentes de alta frecuencia que presenta la señal debido a su forma de onda cuadrada. Este filtro, conjuntamente con el rectificador de precisión de onda

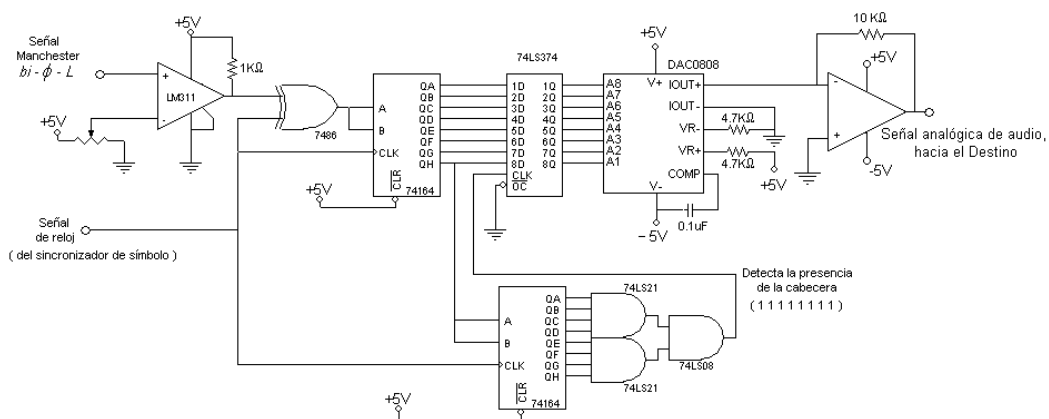


Figura 6. Esquema eléctrico del sistema receptor

completa (operador módulo) [5], son los encargados de realizar la operación no lineal sobre la señal *Manchester* que asegura que la señal resultante tenga una componente de frecuencia al doble de la frecuencia de reloj ($2/T$). De esta manera, un posterior filtrado paso banda permitirá obtener una senoide a dicha frecuencia, que se transformará en una señal cuadrada mediante la utilización de un comparador.

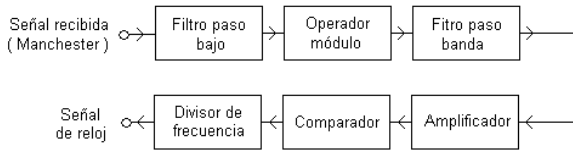


Figura 7. Diagrama de bloques del sincronizador de bit en lazo abierto

Si esa señal se introduce en un divisor digital de frecuencia, obtendremos como resultado una señal con forma cuadrada cuyas transiciones le proporcionará al receptor información sobre el inicio y final del bit, en otras palabras, la señal de reloj.

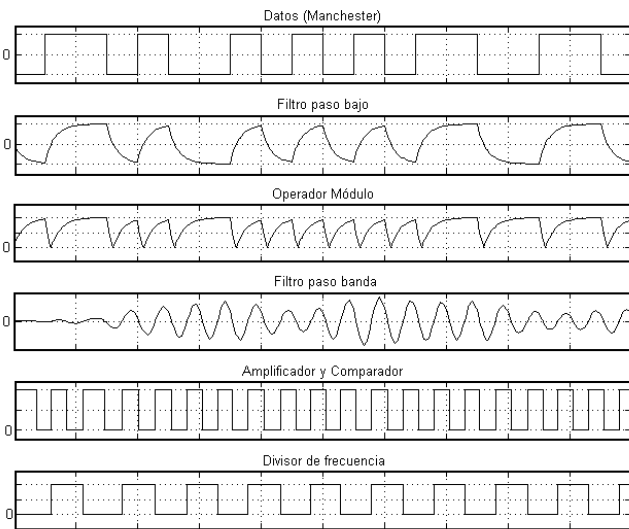


Figura 8. Secuencia de señales asociadas al funcionamiento del sincronizador de símbolo o bit

En la Fig. 8 se muestra una secuencia temporal de las principales señales que describen el funcionamiento del sincronizador y, en la Fig. 9, su esquema eléctrico.

Como se puede observar en la representación eléctrica, se ha optado por utilizar un filtro de realimentación múltiple para realizar el filtrado paso banda, puesto que permiten alcanzar factores de calidad elevados [6]. La frecuencia central del filtro es el doble de la de reloj ($2/T$) y se ha diseñado para que presente un factor de calidad de $Q=8$. Asimismo, se ha utilizado como comparador uno de histéresis o *Schmitt Trigger*, y como divisor de frecuencia, un biestable tipo D realimentado a través de su salida invertida.

D. Planificación de la experiencia

Como se comentó en el apartado de introducción, la experiencia de laboratorio está orientada a alumnos que cursan asignaturas relacionadas con los sistemas de transmisión digital, recogidas en los planes de estudios de las titulaciones de Ingeniero en Electrónica y del Master en Ingeniería Electrónica. Aunque para implementar el sistema de transmisión PCM se podrían emplear dispositivos lógicos programables, como los CPLD y FPGA, se ha optado por utilizar tecnología discreta con la finalidad de facilitar su realización y aportarle un carácter más didáctico. De esta manera, el alumno puede relacionar los diferentes bloques del sistema con los elementos básicos de los que consta un sistema de transmisión digital en banda base.

En general, la experiencia se puede abordar desde una metodología basada en la elaboración de proyectos donde los alumnos se organizan en grupos formados por tres o cuatro miembros. Dentro de cada grupo se elige un coordinador, cuya función es la de repartir y coordinar las tareas que cada uno de los miembros del grupo, para llevar a buen fin la realización de la práctica. Asimismo, dentro del horario de la asignatura se establecen unas sesiones específicas para trabajar y avanzar en el diseño y realización de la experiencia práctica de laboratorio.

III. CONCLUSIONES

La experiencia hardware de laboratorio que se presenta en este trabajo forma parte del proyecto docente de las asignaturas de Sistemas de Comunicaciones II y Sistemas de Comunicaciones Digitales, respectivamente recogidas en los

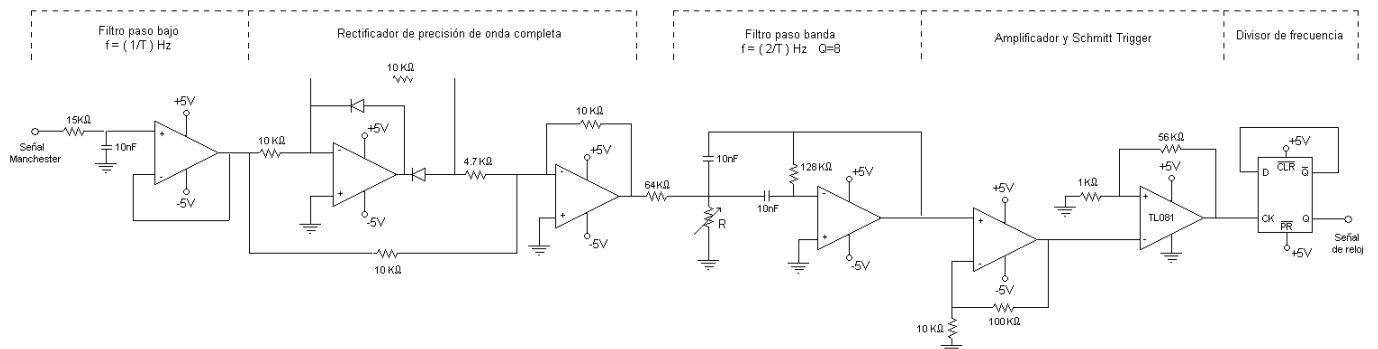


Figura 9. Esquema eléctrico del sincronizador de símbolo o bit

planes de estudios de la titulación de Ingeniero en Electrónica y del Master en Ingeniería Electrónica que se imparten en la Universidad de La Laguna. Dicha experiencia, consistente en el diseño y realización de la electrónica de un sistema de transmisión digital de señales de audio basado en la modulación por codificación de pulsos (PCM), permite al alumno trasladar a la práctica algunos de los conceptos impartidos en las correspondientes clases teóricas: acondicionamiento de señal, códigos de línea, digitalización y reconstrucción de señales, modulación PCM, circuitos de sincronización de símbolo y de trama, etc.

REFERENCIAS

- [1] F.J. Martínez Zaldívar, J.R. Vidal Catalá, Transmisión digital. Servicio de Publicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia. SPUPV-97.74, 1994.
- [2] M. Faúndez Zanuy, Sistemas de Comunicaciones. Ed. Marcombo, Barcelona, 2001.
- [3] B. Sklar, Digital Communications. Ed. Prentice Hall International Editions, 1988.
- [4] Leon W. Couch II, Sistemas de Comunicación Digitales y Analógicos. Ed. Prentice Hall, Quinta Edición, 1998.
- [5] Norbert R. Malik, Circuitos Electrónicos: Análisis, Diseño y Simulación. Ed. Prentice Hall, 2000.
- [6] A.P. Malvino, Principios de Electrónica. Ed. McGrawHill, 2000.