

Ingeniería

Revista de la Universidad de Costa Rica

ENERO / JUNIO 1991 VOLUMEN 1 Nº 1



INGENIERIA

Revista Semestral de la Universidad de Costa Rica

Volumen I Enero-Junio 1991 Número 1

DIRECTOR

Rodolfo Herrera J.

CONSEJO EDITORIAL

Armando Castro A. (editor)
Víctor Hugo Chacón P.
Gerardo Chacón V.
Miguel Dobles U.
Ronald Jiménez Ch.
Ismael Mazón G.
Domingo Riggioni C.

CORRESPONDENCIA Y SUSCRIPCIONES

Editorial de la Universidad de Costa Rica
Apartado Postal 75
2060 Ciudad Universitaria Rodrigo Facio
San José, Costa Rica.

CANJES

Universidad de Costa Rica
Sistema de Bibliotecas, Documentación e Información
Unidad de Selección y Adquisiciones-CANJE
Ciudad Universitaria Rodrigo Facio
San José, Costa Rica

Suscripción anual:

Costa Rica: ₡500,00
Otros países: US \$20.00

Número suelto:

Costa Rica: ₡250,00
Otros países: US \$10.00





Impreso en la
Oficina de Publicaciones
de la Universidad de Costa Rica

Edición aprobada por la Comisión Editorial de la Universidad de Costa Rica
1991 EDITORIAL DE LA UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

Todos los derechos reservados conforme a la ley

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

San José, Costa Rica

Edición Técnica: *Guillermo Loría M.*
Fernando Durán A.

Revisión Filológica: *María Teresa Bolaños*

Montaje Gráfico: *Adalberto Ramírez*

620.005

1-46i

Ingeniería / Universidad de Costa Rica. --

Vol. 1, no. 1 (ene./jun. 1991) -- San José, C. R. : Editorial de la Universidad de Costa Rica, 1991 -- (Oficina de Publicaciones de la Universidad de Costa Rica)

v. : il.

Semestral.

1. Ingeniería -- Publicaciones periódicas.

CCC/BUCR-250



CODIFICADOR Y DECODIFICADOR BIPOLAR AMI

Ing. Jorge Arturo Romero Chacón M.Sc.*

Resumen

El presente artículo tiene dos objetivos básicos. El primero de ellos es realizar un estudio breve de los códigos para transmisión de datos en banda base (bipolares) y en particular, llevar a cabo una comparación entre el código bipolar AMI y otros de uso común. Para ello se recurrirá al empleo de varios conceptos relacionados con los códigos en estudio, los cuales se explicarán en el transcurso del desarrollo del tema.

El segundo objetivo consiste en presentar una solución al problema planteado por la construcción del sistema codificador-decodificador que siguiera el canon establecido por el código AMI. El diseño propuesto, ensayado con éxito en el laboratorio, se detalla en su funcionamiento.

El código AMI, por su sencillez, origina una posibilidad cómoda en la codificación de datos binarios, no exenta de ciertas propiedades necesarias que garantizan un envío seguro, una recepción de calidad y un tratamiento posterior que recupera íntegramente el mensaje.

Summary

The present article has two objectives. The first objective is to accomplish a brief study in transmission codes for baseband data, and in particular, to make a comparison between the AMI (Alternate Mark Inversion) code and other common codes. We restrain the analysis to the so-called bipolar codes, and we use several communication concepts to highlight properties and other key points. The second objective is to present a design for an AMI codifier-decodifier system for 2400, 1200, 900, 600 and 300 bit/s transmission rates. The AMI code provides a good solution to the problems of quality reception, an efficient error performance and a simple decoding procedure.

CODIGOS DE TRANSMISION DIGITAL EN BANDA BASE

El código de transmisión más simple en banda base es el unipolar; sin embargo, su empleo plantea tres problemas básicos. El primero es que la transmisión de largas secuencias de ceros produce una reducción del componente discreto de sincronía. El segundo se debe a que el espectro (gráfico de la función de densidad espectral) unipolar contiene energía significativa a bajas frecuencias; esto indica que cuando se emplea acoplamiento ac, la cadena de pulsos estará sometida a un sobrenivel dc y que habrá una variación grande en la energía, debido a la aleatoriedad intrínseca de la secuencia binaria. El tercero proviene del hecho de que no es posible conocer (o monitorear) la tasa de errores de línea, a menos que se conozca la estadística de la fuente digital.

La existencia de estos tres problemas son fundamentalmente las razones que impulsan utilizar la codificación de la señal unipolar.

La codificación con la que se trata aquí se conoce como bipolar y a ésta pertenecen los códigos AMI, 4B3T, PST y otros.

Los códigos bipolares caben dentro de la denominación de códigos alfabéticos, que mapean bloques de bits de información binaria en bloques de símbolos de varios niveles de acuerdo con el estado del codificador. Un código de línea alfabético ternario mapea bloques de M dígitos binarios de información en bloques de N símbolos ternarios (de tres niveles), empleando reglas de codificación que dependen del estado de la secuencia transmitida al momento de la codificación. Para el código AMI, $M = N = 1$.

CODIGOS BIPOLARES

El primer código bipolar, originado alrededor del año 1960 en los laboratorios de la Bell Telephone durante la experimentación con los primeros sistemas PCM, fue el código AMI (del

* Escuela de Ingeniería Eléctrica
Universidad de Costa Rica

inglés "Alternate Mark Inversion", inversión alternada de unos) consistente en la codificación alternada de unos binarios como pulsos positivos y negativos (+5 y -5 voltios) y en la indicación de los ceros binarios como la ausencia de un pulso. Para este código, la razón de envío de información es igual a la razón binaria de entrada. El espectro de potencia de una secuencia bipolar con magnitudes disímiles entre pulsos positivos y negativos contiene tanto parte discreta como continua. Para pulsos balanceados positivos y negativos el espectro discreto desaparece.

Véase un ejemplo de la codificación bipolar:

Entrada binaria	1 0 0 1 0 0 0 1 1 1 0 1
Salida Bipolar AMI	+0 0 - 0 0 0 + - +0 -

En la figura 1 se puede observar que este código mitiga el problema del sobrenivel de por la reducción provocada en la energía de baja frecuencia; además, provee un medio para chequear errores en la línea (monitoreo del error) ya que cualquier error aislado, ya sea que desprece un pulso u origine un pulso, ocasionará una violación de la propiedad de alternabilidad.

Si bien este código soluciona estos dos problemas, no resuelve el de sincronía ocasionado por una larga cadena de ceros: una cadena grande de ceros a la entrada del modulador bipolar produce una larga cadena de ceros a su salida. Códigos que sustituyen una secuencia de símbolos con una característica especial por un número determinado de ceros son llamados

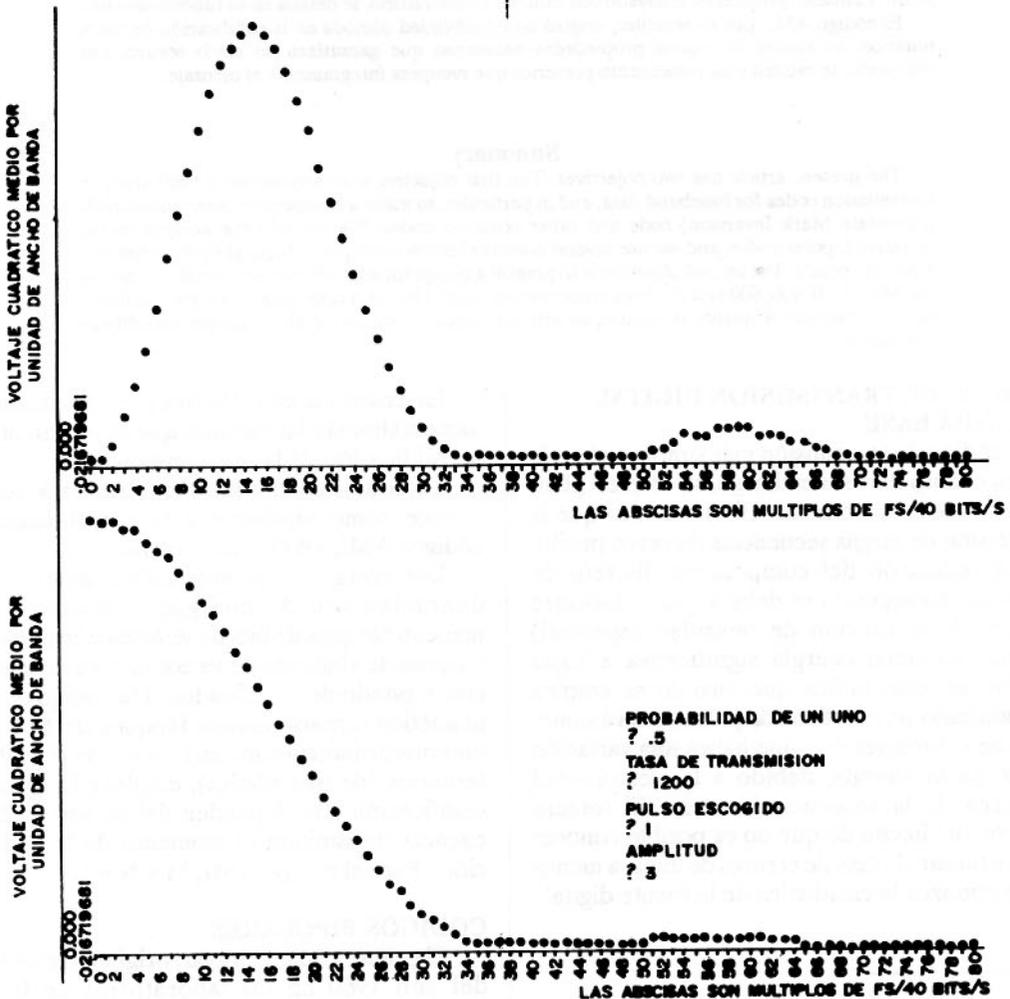


FIGURA 1. Gráficos de función de densidad espectral de potencia contra frecuencia. a) Pulso rectangular bipolar. b) Pulso rectangular unipolar.

bipolares con sustitución de N ceros (BNZS). Un código B6ZS por ejemplo, sustituye ya sea 0+ -0- + 0 0- + 0+ - por bloques de seis ceros consecutivos, dependiendo de la polaridad del último pulso transmitido. Si el último pulso fuera un +, entonces se usa la secuencia 0+ -0- +.

Como ejemplo, véase el siguiente:

```

Entrada binaria  1 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 1 1 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1
Salida Bipolar B6ZS  - 0 0 0 + 0 + - 0 - + - + 0 - 0 - + 0 + - 0 - + 0 + - +
    
```

Ambas secuencias de sustitución están equilibradas, o sea, con igual número de pulsos + y -.

Ligeramente diferente a los códigos anteriores, se tiene el código PST (del inglés "pair selected ternary") en donde la modulación ternaria (la codificación puede verse como un proceso especial de modulación) principia por descomponer la cadena de bits de los datos de entrada en pares de bits de datos y los codifica siguiendo la tabla 1.

El sobrenivel dc es controlado por la alternación del modo que es equivalente a la polaridad alternada de la codificación AMI. Pares de ceros en la secuencia binaria son traducidos en pulsos, de modo que se asegura la información de sincronía. Finalmente, las características de este código aseguran cierta capacidad para evaluación del error. Para la decodificación de la señal PST, es necesario tomar por pares los símbolos ternarios de manera adecuada para recobrar la secuencia original.

TABLA 1 TABLA LOGICA PST		
Binario	Modo +	Modo -
11	+ -	+ -
10	+ 0	- 0
01	0 +	0 -
00	- +	- +

CODIFICACION BIPOLAR PST Hay un cambio de modo después de cada ocurrencia de par binario 10 ó 01

Como resultado de la investigación alrededor del problema de sincronía ocasionado por las largas cadenas de ceros se han propuesto los códigos bipolares compatibles de alta densidad (HDB), que constituyen una variación del AMI. La idea básica es que cuando una corrida de más

de n ceros ocurra, el cero $(n + 1)$ -ésimo sea reemplazado por un uno para aumentar el contenido de sincronía. Para identificar este uno como sustitución, se introduce con la misma polaridad que el uno precedente, violando de este modo la regla de la inversión alternada, pero haciéndolo de modo que no introduzca un componente dc en la codificación: el codificador llevará un control sobre la historia de la señal y si se solicitaran dos violaciones de la misma polaridad, se haría una doble sustitución. Tal reemplazo consistiría en que el primer cero en la corrida de $(n + 1)$ ceros se sustituye por un uno que obedece la regla AMI y el cero $(n + 1)$ -ésimo se reemplaza entonces por un uno de la misma polaridad que el último uno transmitido. Luego, el decodificador chequea dos parámetros. Primero, una violación a la regla AMI, y segundo, el número de ceros precedentes a esta violación, para determinar si el último uno transmitido es también una sustitución. El miembro general de la familia de códigos definidos por la regla precedente se denota HDB n , donde n es la máxima corrida admisible de espacios.

Véase el siguiente ejemplo donde se usa el código HDB3:

```

Entrada Binaria  0 1 0 1 1 1 0 0 0 0 1 0 1 1 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 1 1 1 0 1 0 1 0
Salida Codificada  0 + 0 - + - 0 0 0 - + 0 - + 0 - + 0 0 + - 0 0 - 0 0 + 0 - + 0 - 0 + 0
    
```

El asterisco indica las violaciones a la regla AMI.

Los códigos alfabéticos ternarios son denotados en general por MBNT (M dígitos binarios - N dígitos ternarios). Para los códigos dejados atrás, $M=N$. Códigos donde $M \neq N$ son por ejemplo 4B3T, 7B5T, 10B7T, denotando cada uno de ellos en realidad una clase de códigos, debido al número enorme de combinaciones que pueden lograrse con cualquiera de esas denominaciones.

La clase 4B3T, en particular, convierte grupos de cuatro dígitos binarios en grupos de 3 dígitos ternarios: los bloques binarios representan 16 palabras de código posibles, mientras que los correspondientes 3 símbolos ternarios pueden proporcionar 27 combinaciones. El diseño del código de acuerdo con las propiedades con que se le desee dotar (eficiencia, capacidad de detección y corrección de errores, espectro de energía favorable, adecuada sincronización del contenido de la información) se reduciría a apa-

rear los grupos binarios y ternarios de modo tal que se consigan tales propiedades. El código MS43 es un ejemplo de esta clase de códigos. Todos los códigos de este tipo emplean la alternación de modo: cierto número de alfabetos ternarios son usados para representar las 16 señales binarias, y cada alfabeto en particular define el modo del código, y éste se determina por alguna medida de la historia pasada de la señal. Como esta historia será conocida por el decodificador, es posible la decodificación instantánea.

EL CODIGO AMI FRENTE A OTROS CODIGOS BIPOLARES

El efecto inmediato que sufre la señal digital unipolar en su paso por un codificador bipolar es el desplazamiento de su espectro de potencia, consiguiéndose anular la contribución espectral de la frecuencia cero. Esto se aprecia con detalle en las figuras 1a. y 1b. donde se puede comparar la parte continua del espectro de la señal unipolar con el espectro de la bipolar AMI para un pulso tipo rectangular. Tal corrimiento del espectro consigue disminuir la distorsión sufrida por la señal al pasar por un medio cuya respuesta a bajas frecuencias es pobre, o dicho de otra forma, se disminuye con ello las pérdidas en potencia sufridas por la señal por la existencia de un componente de presente en la señal unipolar, pero ausente en la bipolar. De paso se obtiene la ventaja de eliminar el problema de acople ac que se presenta algunas veces a la señal unipolar.

La característica de corrimiento del espectro es común a todos los códigos bipolares y no privativo del AMI.

Los códigos mencionados comparten la posibilidad de realizar monitoreo del error, pero difieren bastante en el parámetro de la eficiencia, definido como la razón entre la capacidad de información de la señal recibida y la de la señal codificada, siendo en este punto bastante dispares. Para códigos donde $M=N$ la eficiencia, medida del grado de uso de la capacidad de información disponible, es de 63%, en tanto para los códigos 4B3T, donde $M=4$ y $N=3$, es del 84%.

El código AMI presenta una desventaja bastante seria cuando se considera el punto del tratamiento recibido por los patrones de señal que contienen baja densidad de unos y que se presentan a la entrada del codificador. El codificador AMI producirá en tales casos una salida carente de información de sincronía, de manera contraria

a un codificador B6ZS, HDB3 ó MS43, pues en la salida de éste último las cadenas de ceros estarán sustituidas por cadenas de símbolos ternarios adecuados que enriquecen el contenido de sincronía de la señal a transmitir.

No obstante, la situación cambia cuando la trayectoria de transmisión la constituyen cables trenzados. En este caso, al comparar, por ejemplo, el código PST y el B6ZS frente al AMI, aquellos transmiten más potencia en casi todas las frecuencias debido a la mayor información de sincronía que los caracteriza, pero esto mismo entraña una mayor diafonía en el sistema que emplea ambos códigos. Se plantea entonces un compromiso entre la diafonía y la propiedad del contenido de sincronía: si la fuente digital envía una señal cuyo patrón no contiene cadenas de ceros, es mejor utilizar el código AMI pues su espectro de energía es mejor en el aspecto de la diafonía que los otros dos considerados.

Otro aspecto no menos importante que los anteriores, es la incidencia del SNR, razón señal a ruido, sobre la transmisión, y la vulnerabilidad que muestre cada código ante la presencia de ruido y de la interferencia entre símbolos. Se ha demostrado al respecto, que el código AMI frente a tres códigos, cada uno perteneciente a las clases 4B3T, 7B5T, 10B7T, requiere de un mayor nivel de señal para una transmisión en presencia de interferencia entre símbolos y ante una misma probabilidad de error. En estas consideraciones hay que pesar, junto con las propiedades y parámetros ya discutidos, el grado de complejidad alcanzado, pues este incide directamente sobre el costo de construcción de los circuitos del sistema codificador-decodificador.

En última instancia, el formato de código óptimo para una línea de transmisión digital es aquel que proporciona un comportamiento apropiado al mínimo costo.

DISEÑO DEL CODIFICADOR Y DEL DECODIFICADOR BIPOLAR AMI

En las figuras 2 y 3 se muestran los circuitos finales del codificador y del decodificador.

Codificador bipolar AMI

Está constituido por tres partes:

1. Generador de pulsos

Lo constituye un temporizador 555 y la circuitería adicional que lo acompaña: un conmutador, que permite el uso de cinco velocidades diferentes para las que se diseñó el codificador (2400, 1200, 900, 600 y 300 bits/s); un condensador

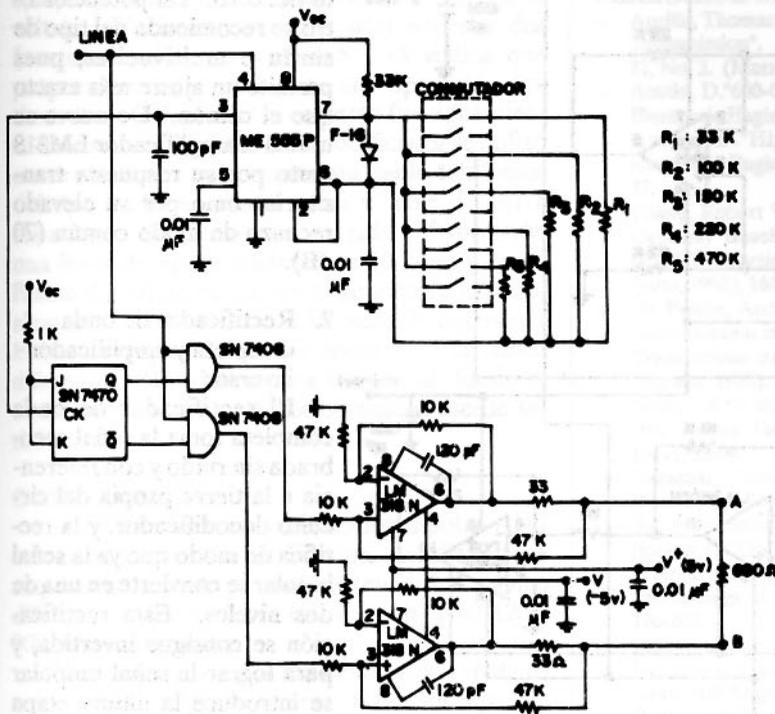


FIGURA 2. Circuito codificador bipolar AMI.

de 100 pF conectado entre salida (patilla 3) y tierra, que lo que persigue es eliminar la espiga producida por una falta de linealidad durante el tiempo de caída en la salida del temporizador; y varios componentes más que hacen obtener una configuración adecuada para ondas de salida con un ciclo de trabajo menor o igual al 50%. Una característica importante de esta etapa es que la patilla 4 (Reset) del temporizador está manejada por la línea (de entrada de datos), de modo que cuando la línea presenta un cero lógico, la salida del temporizador es cero, y cuando la línea presenta un uno el temporizador da la salida de oscilación correspondiente al generador de pulsos.

2. Divisor de unos

La segunda etapa del codificador está formada por un flip-flop en modo T ($Q = \bar{Q}$) con reloj manejado por la salida del temporizador, y dos compuertas y, que ejecutan su operación lógica entre la línea y las salidas Q y \bar{Q} - del flip-

flop. Aquí es donde se consigue separar en dos canales los unos de la información binaria, siendo alternada esa separación.

3. Etapa de salida balanceada

La última etapa del circuito es una salida balanceada-impulsora, hecha con base en dos fuentes de corriente bilaterales, necesaria para dar a las señales de los dos canales provenientes de la etapa anterior la capacidad para su transmisión por un par telefónico. Dos condensadores de 0,01 μ F se agregaron para eliminar ruido originario de las dos fuentes de alimentación. Finalmente, la señal bipolar correspondiente a la entrada unipolar es la diferencia de potencia entre los puntos A y B, que en la figura 2 son los terminales de una resistencia de carga de 680 ohmios. El funcionamiento del codificador por cada una de sus secciones constituyen-

tes se comprende mejor recurriendo a la figura 4 que muestra los diagramas de temporización correspondientes.

El temporizador trabaja en modo astable cuando la línea se halla en nivel alto (recuérdese que la patilla 4 está controlada por esa entrada). Al mismo tiempo, la salida del temporizador es el reloj del flip-flop cuyos bordes positivos de señal ocasionan los cambios de las salidas Q y \bar{Q} . Luego las compuertas hacen la "y" lógica (Q línea) y (\bar{Q} - línea) para separar los "unos" en dos canales diferentes cuyas salidas conseguidas en la amplificación dan mediante la diferencia de potencial entre ambas, la salida bipolar.

Se escogió el amplificador operacional LM-318M por su excelente característica de respuesta transitoria (razón de crecimiento = 50 V/ μ s mínimo) superior al popular LM741CN.

El codificador bipolar requiere de dos fuentes de 5 y -5 voltios, siendo necesario para la primera que proporcione 85 mA mínimos y la segunda 20 mA.

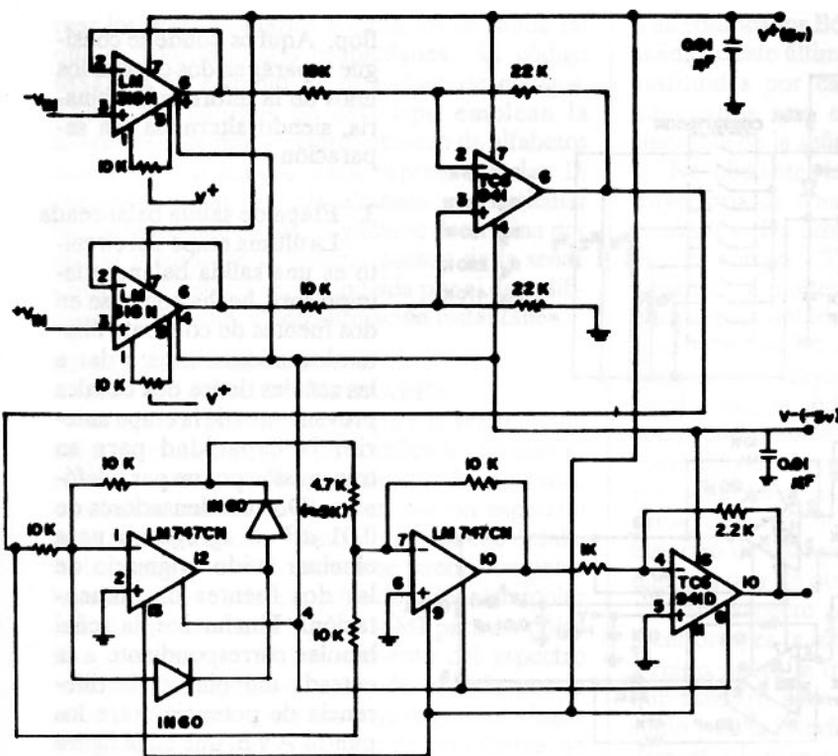


FIGURA 3. Circuito decodificador bipolar AMI.

Decodificador Bipolar AMI

Consta de dos secciones:

1. Amplificador de instrumentación

El amplificador de instrumentación de entrada diferencial y salida de terminación simple es uno de los más importantes amplificadores de procesamiento de señales disponibles. Se usa para la amplificación con precisión de señales ac, de diferenciales en tanto que rechaza valores elevados de ruido de modo común. Dos seguidores de voltaje en la figura "bufeizan" (separan) la señal de entrada del resto del circuito para obtener una buena característica de entrada; aquéllos manejan un amplificador diferencial balanceado, que da ganancia y rechaza el voltaje de modo común. Durante el trabajo de laboratorio pudo comprobarse la elevada sensibilidad de este tipo de amplificador al voltaje de desplazamiento del cero presente en cada uno de los amplificadores operacionales, debido a que el ajuste de ganancia (dado por las resistencias) y el CMRR interactúan; he ahí la razón por la cual se le agrega a cada amplificador operacional un potenciómetro de 10K para anular el voltaje de desplazamiento

del cero. Tal potenciómetro se recomienda del tipo de sinfín o multivuelta, pues permite un ajuste más exacto que el común. De nuevo se utilizó el amplificador LM318 tanto por su respuesta transitoria como por su elevado rechazo de modo común (70 dB).

2. Rectificador de onda completa y amplificador inversor

El rectificador de onda completa toma la señal recuperada sin ruido y con referencia a la tierra propia del circuito decodificador, y la rectifica de modo que ya la señal bipolar se convierte en una de dos niveles. Esta rectificación se consigue invertida, y para lograr la señal unipolar se introduce la última etapa del amplificador inversor con el objeto adicional de convertirla a un nivel TTL reconocible.

Para el rectificador de onda completa se empleó dos diodos de germanio 1N60, con el fin de conseguir una rectificación más exacta. Nuevamente, como hay varios circuitos integrados operando juntos, a las fuentes de poder se les agrega sendos condensadores de disco de

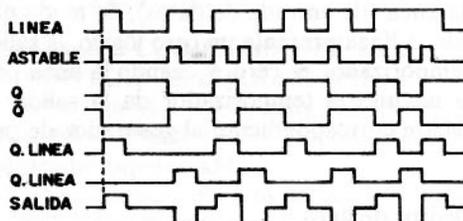


FIGURA 4. Diagramas de temporización del codificador.

0,01 μ F para asegurar estabilidad en la entrega de voltaje. El circuito decodificador necesita dos fuentes de alimentación de 5 y -5 voltios que proporcionen 31,2 mA para una operación óptima. Para comprobar el correcto funcionamiento del sistema codificador-decodificador se utilizó como medio de transmisión un cable telefónico del tipo multipar, de 10 pares y cable de tierra conectados de modo que se tenía a disposición una línea de aproximadamente 1065 m; y como fuente digital de excitación el generador pseudoaleatorio, propiedad de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, capaz de proporcionar 4 de las cinco diferentes velocidades para las que se diseñó el codificador. Los resultados obtenidos fueron satisfactorios.

CONCLUSIONES

Se ha diseñado un codificador bipolar AMI con su respectivo decodificador, atendiendo los requisitos de envío por un par telefónico y cinco diferentes velocidades de transmisión (2400, 1200, 900, 600 y 300 bits/s).

El código bipolar AMI tiene varias ventajas sobre otros códigos bipolares: posee un espectro que desfavorece la diafonía en cables trenzados; carece de complejidad la construcción de su respectivo codificador; es fácil comprender su funcionamiento; evita la propagación de errores; la detección de errores es simple en la transmisión de la señal y contiene la innegable característica de lograr una densidad espectral favorable a la eliminación del componente dc de la señal binaria sin implicar un deterioro en las propiedades del código.

A pesar de contar con las características anteriores, el código AMI tiene el problema de carecer de contenido de sincronía al codificar señales de baja densidad de unos.

El código AMI, por lo tanto, ha de usarse en aquellos sistemas de transmisión en banda base en los que no se produzca como regla usual la emisión de señales con largas cadenas de ceros. En tal caso, su empleo no es adecuado, con lo que se debería de emplear algunos de los códigos HDB3 ó B6ZS, discutidos al inicio, que son indicados para la situación.

Se considera que no obstante su defecto principal, el código en estudio concilia bien los dos aspectos no siempre armoniosos entre sí, de un comportamiento óptimo y un costo conveniente.

BIBLIOGRAFIA

- Aprille, Thomas J. "Filtering and Equalization for Digital Transmission". *IEEE Communications Magazine*, vol. 21, No. 2. (Marzo, 1983), 17-24.
- Austin, D. "600-Ohm Balanced Driver for Line Signals". *Electronic Engineering*, vol. 50, No.608 (junio, 1978), 32.
- Austin, D. "High Output 600-Ohm Line Driver". *Electronic Engineering*, vol. 55, No.674 (febrero, 1983), 37.
- Chang, Robert W.S. et al. "Line Code Design for High Capacity Baseband Digital Transmission Systems". *IEEE Transactions on Communications*, COM-30, No.7 (julio, 1982), 1668-1678.
- De Pistoia, Andre et al. "Effect of Coding on the Jitter Accumulation in Baseband Digital Transmission". *IEEE Transactions on Communications*, vol. COM-30, No.38 (Agosto, 1982), 1818-1827.
- Mayo, J.S. "A Bipolar Repeater for Pulse Code Signals". *Bell System Technical Journal*, Vol. 41, No.1. (enero, 1962), 25-98.
- Takasaki, Yoshitaka. "Optimizing Pulse Shaping for Baseband Digital Transmission with Self-bit Synchronization". *IEEE Transactions on Communications*, vol. COM-28, No. 8 (Agosto, 1980), 1164-1172.
- Wier, J. M. "Digital Data Communication Techniques". *Proceedings of the IRE*, Vol. 49, No.1. (Enero, 1961), 196-209.
- Belove, Charles; Schilling, Dinald L. "Electronic circuits: Discrete and Integrated". Segunda edición. Tokio: McGraw-Hill Kogakusha, Ltd. 1979.
- Bennett, William R.; Davey, James R. "Data Transmission". New York: McGraw-Hill Book Company 1965.
- Bylanski, P. Ingram, D.G.W. "Digital Transmission". Tercera impresión. Surrey, Inglaterra: Peter Peregrinus, Ltd., 1979.
- Engineering Staff. "The TTL Data Book for Design Engineers". Segunda edición. Dallas: Texas Instruments Inc., 1976.
- Hnatek, Eugene R. "Applications of Linear Integrated Circuits". New York: John Wiley and Sons, Inc., 1975.
- Lathi, B.P. "Communication Systems". New York: John Wiley and Sons, Inc., 1968.
- Romero, Jorge "Codificador y decodificador bipolar AMI". Proyecto Eléctrico I, Universidad de Costa Rica. Febrero, 1984.
- Schwartz, Mischa. "Information Transmission, Modulation and Noise". Tercera edición. New York: McGraw-Hill Book Company, 1980.
- Shanmugan, K. Sam. "Digital and Analog Communication Systems". New York: John Wiley and Sons, Inc. 1979
- Spilker, Jr. James J. "Digital Communications by Satellite". Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1977.
- Stremmler, Ferrel G. "Introduction to Communication Systems". Segunda Impresión. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, 1979.
- Technical Staff, Bell Telephone Laboratories. "Transmission Systems for Communication". Cuarta edición. Winston-Salem, North Carolina: Bell Telephone Laboratories, Inc., 1971.