

# LOS “TURBO CÓDIGOS”, NUEVOS SUBSISTEMAS DE CODIFICACIÓN DE CANAL PARA MEJORAR LA TRANSMISIÓN DIGITAL DE GRAN CAPACIDAD

Enric Armengol Roig, J.A. Delgado-Penín

**H**oy en día no es sorprendente que la información se codifique con objeto de controlar (detectar y corregir) los errores que se originan como consecuencia del paso de las señales por el medio de transmisión. Es más, resulta difícil pensar en un sistema que no incorpore tales mecanismos. Si se analizara el lenguaje natural, se observaría en él multitud de reglas (fonéticas, ortográficas, léxicas, sintácticas,...) que permiten que sólo muy pocos de los posibles mensajes recibidos tengan sentido. Debido a esta *redundancia* se puede distinguir un mensaje que llega «limpio» al receptor de otro que se ha visto distorsionado por el medio a través del cual ha sido transmitido.

Por otra parte, en caso de recibir un mensaje erróneo no es extraño que el subsistema receptor trate de buscar el mensaje (con sentido) que se asemeje más al recibido, es decir, que cumpla las reglas que permiten admitir el mensaje recibido como «bueno» con el mínimo cambio significativo sobre el mismo. Tampoco resulta nada raro que el receptor del mensaje pida la retransmisión de

ENRIC ARMENGOL ROIG es proyectista en la ETSETB.  
JOSÉ ANTONIO DELGADO-PENÍN es profesor de la ETSETB y catedrático de Universidad.

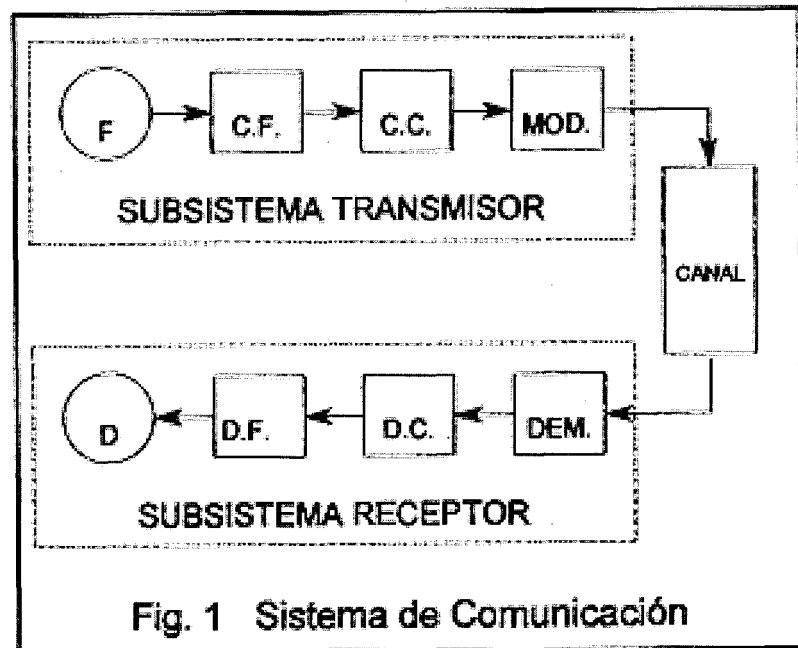


Fig. 1 Sistema de Comunicación

aquel en caso de verse incapaz de reconstruir la información desvirtuada.

El precio que se paga por disponer de un subsistema capaz de reducir la probabilidad de recibir un mensaje erróneo es aumentar la longitud del mensaje. Así pues, la importancia del sistema corrector de errores estriba en disminuir los errores en recepción, bien aumentando la longitud del mensaje de forma mínima, o bien intercambiando tiempo de transmisión por fidelidad de la infor-

mación recibida. La protección de un sistema contra las perturbaciones que puedan afectar a la información transmitida se lleva a cabo en el transmisor (a la entrada del modulador). De forma análoga, la eliminación de toda la *redundancia* que introduce dicha protección se efectúa en el receptor (a la salida del demodulador), tal y como se puede observar en la figura 1.

La **codificación de canal** desarrolla y analiza códigos orientados a facilitar la detección y corrección de los errores ocasionales que pueda in-

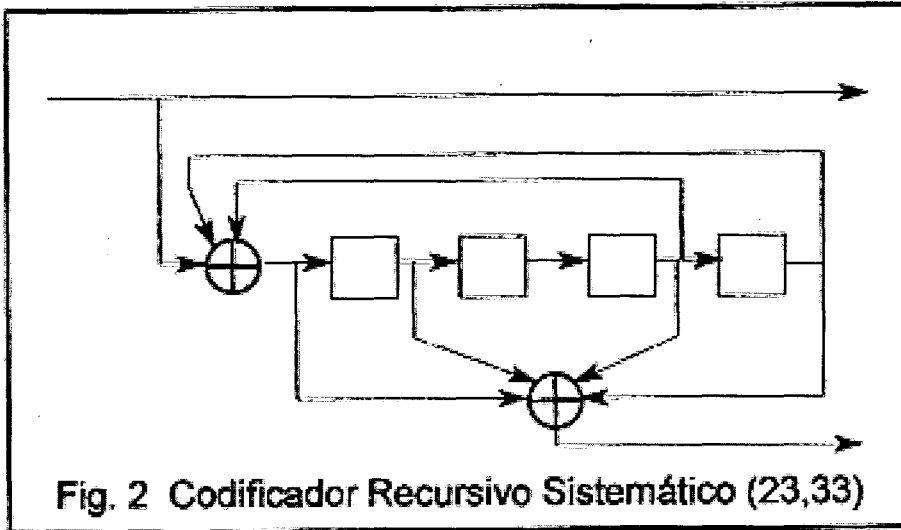


Fig. 2 Codificador Recursivo Sistemático (23,33)

troducir el canal de transmisión. En todo sistema de transmisión de la información es tan importante disponer de una buena codificación de canal, como lo puedan ser la integridad y la fiabilidad de la información que alcanza al destinatario.

Por lo que respecta a la investigación en teoría de la codificación, han sido muchos los avances que se han realizado hasta nuestros días, y también muchos los códigos desarrollados para reducir cada vez más la probabilidad de error en la entrega de la información al destinatario. Como consecuencia del conocimiento adquirido, se llega a un conjunto de criterios intuitivos que permiten establecer unas pautas generales en la búsqueda de nuevos códigos que superen en prestaciones a los anteriores. De este modo fueron propuestos en 1993 [1] los denominados "turbo códigos", cuyas sorprendentes características han sido desde entonces uno de los principales centros de interés de las investigaciones que se está llevando a cabo en este terreno.

### El codificador

Los "turbo códigos" son una familia de códigos concatenados o unidos en paralelo. La creación de los mismo parte de un conjunto concreto de códigos básicos denominado: **códigos constituyentes**, formán-

dose una palabra código de salida a partir de los bits de redundancia de cada uno de los códigos constituyentes. Un ejemplo de lo que significa la concatenación en paralelo puede ser el de imaginar que se está transmitiendo la misma información en dos lenguas distintas simultáneamente. La transmisión de un mismo mensaje con distintas codificaciones de forma simultánea puede facilitar el proceso de detección y corrección de errores en el receptor de manera decisiva.

Los códigos constituyentes de los "turbo códigos" son códigos convolucionales. A pesar de que el ahorro de complejidad de decodificación en estos códigos, por hacerlos sistemáticos (el bit de entra-

da aparece en la palabra código) sea despreciable y no haya razón alguna para definirlos de esta manera, toda la bibliografía que se encuentra hace referencia a ellos. Se consideran códigos binarios, siendo de la misma clase sus códigos constituyentes.

De los estudios realizados se desprende que los códigos constituyentes que proporcionan mejores prestaciones son los *Códigos Convolucionales Recursivos*

*Sistemáticos* (RSC). Los RSC son códigos convolucionales realimentados, es decir, la entrada al registro de desplazamiento del codificador no solo depende del bit de entrada, sino que, también es función del contenido de dicho registro. Los RSC son códigos de respuesta impulsional infinita. Cuando el vector representativo de las conexiones de realimentación está asociado a un polinomio primitivo, la salida en régimen permanente es una secuencia pseudoaleatoria de máxima longitud. En la figura 2 se muestra un ejemplo de codificador RSC.

Los códigos constituyentes en los "turbo códigos" se concatenan en paralelo por medio de **entrelazadores**. Esto significa que

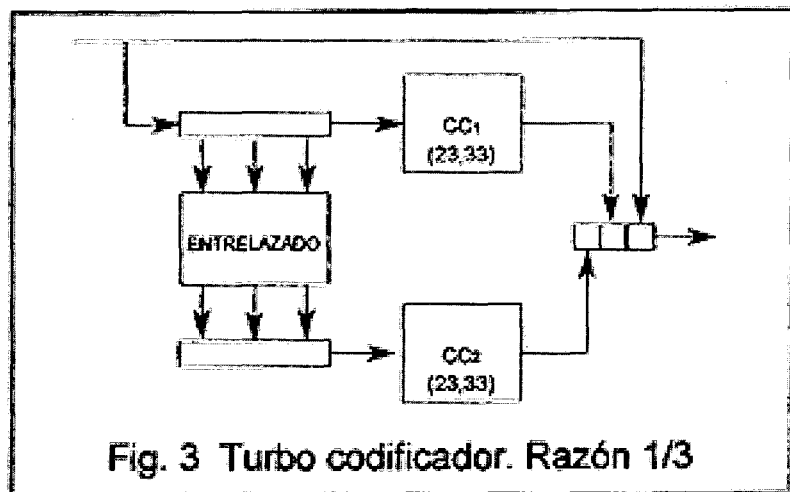


Fig. 3 Turbo codificador. Razón 1/3

los bits se toman en grupos de una cierta longitud, proporcionando a cada codificador constituyente una permutación distinta de cada grupo. Barajando la información a la entrada de cada codificador, se pretende crear dependencia entre bits no consecutivos, dando a cada bit capacidad de corrección sobre otros bits alejados del mismo. Estos códigos pueden verse como *códigos entrelazados* que se transmiten simultáneamente, o bien como la transmisión en paralelo de la información codificada, por *canales entrelazados*. Cabe observar

que cada *canal entrelazado* facilita al decodificador la corrección de ráfagas de errores a la vez que disminuye la tasa de errores que aparecen distribuidos de forma aleatoria.

Los "turbo códigos" son códigos lineales, puesto que la salida se puede obtener como superposición de respuestas a las excitaciones que componen la entrada. Los entrelazadores fuerzan una respuesta impulsional distinta a cada bit del grupo que se permuta, confiriéndole al subsistema un carácter variante (cíclicamente).

A pesar de que la definición de los "turbo códigos" es muy genérica y deja abiertas muchas posibles combinaciones en función de la clase, número de códigos constituyentes y de los entrelazadores, los estudios realizados se centran en estructuras formadas por dos códigos constituyentes RSC binarios unidos por un entrelazador. En la figura 3 se muestra un ejemplo de "turbo codificador".

El papel que juega el entrelazador en la estructura es importante, pudiendo variar mucho las prestaciones del subsistema, según el tipo de entrelazador. Las prestaciones de

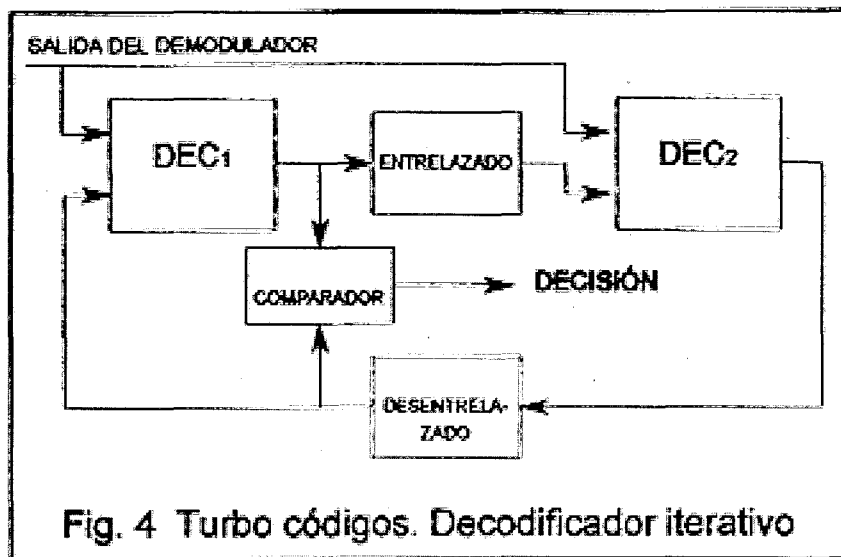


Fig. 4 Turbo códigos. Decodificador iterativo

un subsistema mejoran aumentando el tamaño del entrelazador [2].

#### El decodificador

La decodificación de los "turbo códigos" no responde a un único algoritmo de decodificación. En el proceso de decodificación de códigos concatenados, dos o más decodificadores constituyentes suelen pretender tomar una decisión sobre una misma información recibida. La decisión final debe tomarse a partir de las decisiones de los decodificadores constituyentes y alguna información adicional que permita discriminar entre ellas. En este sentido, algunos de los algoritmos propuestos se basan en modificaciones sobre el algoritmo de Viterbi, con la intención de obtener a la salida del

decodificador algún tipo de información de fiabilidad además del símbolo decodificado. Esta idea motivó la aparición del SOVA (Soft Output Viterbi Algorithm) a finales de los

ochenta [3]. Este tipo de algoritmos suponen una clase subóptima de decodificación de los "turbo códigos", dada su incapacidad de obtener

una distribución de probabilidades a posteriori (APP) para cada símbolo recibido, aunque la degradación que introducen no es muy significativa si las operaciones se realizan bit a bit.

Otra posibilidad es la de los algoritmos de decodificación que hacen uso de la máxima probabilidad a posteriori (MAP). Estos algoritmos, conocidos desde principios de los setenta y menos populares que el algoritmo de Viterbi se han visto reavivados recientemente con la aparición de los "turbo códigos". En ellos, el decodificador proporciona a la salida la secuencia de distribuciones APP de los símbolos de información, es decir, sin forzar decisión alguna facilita la información más completa posible sobre el conjunto de palabras código para cada palabra recibida, después de haber recibido toda la secuencia. La decodificación por medio de algoritmos basados en la MAP es óptima si se conoce la probabilidad a priori asociada a cada palabra código.

El decodificador se compone de tantos decodificadores constituyentes como códigos constituyentes tiene el código y cada uno de ellos calcula una distribución APP a partir del símbolo demodulado y de una distribución de probabilidades a la entrada, de acuerdo con las reglas que rigen su código. El algoritmo central de cada uno de estos bloques se basa en el algoritmo de Bahl o en modifi-

### Los códigos constituyentes de los "Turbo Códigos" son códigos convolucionales

caciones del mismo [4]. Este algoritmo óptimo, no es implementable puesto que precisa de toda la secuencia de símbolos demodulados para poder proporcionar la secuencia de distribuciones APP. Este problema se puede salvar transformando el "turbo código" en un código bloque equivalente. Como consecuencia, disminuye la velocidad de transmisión.

La secuencia final de distribuciones APP se alcanza por un método iterativo en el cual la secuencia de distribuciones APP de salida de un decodificador constituyente alimenta la entrada de otro, siendo previamente entrelazada o desentrelazada (según corresponda), hasta que la diferencia entre estas distribuciones sea insignificante. La convergencia de dicho método depende de la relación señal-ruido, requiriendo mayor número de iteraciones como menor sea dicha relación. En la figura 4 puede verse el esquema del decodificador.

### Prestaciones y Aplicaciones

Los "turbo códigos" poseen unas características que los hacen muy útiles para comunicaciones digitales en las que se precisa alta fiabilidad con baja relación señal-ruido. Se han obtenido por simulación ganancias muy cercanas al límite teórico de Shannon, a la vez que se utilizan técnicas iterativas de decodificación relativamente simples. En la figura 5 se muestra la tasa de error con el decodificador descrito, en función de la relación señal-ruido, después de hacer cinco iteraciones.

Son sus buenas prestaciones con cocientes señal-ruido bajos los que hacen que estos códigos se estén im-

poniendo cada vez más como los favoritos para comunicaciones digitales muy exigentes (TV digital, etc.).

Como inconveniente cabe constatar que los "turbo códigos" no son apropiados en aplicaciones sensibles al retardo de decodificación, a menos que no se transmitan tramas

cortas. Existen estudios realizados sobre "turbo códigos" orientados a sistemas de transmisión con tramas de 192 bits (según recomendación GSM), para aplicaciones de transmisión de voz en sistemas móviles.

Los "turbo códigos" se contemplan también como un buen compromiso entre prestaciones y complejidad para los sistemas COFDM [5], adoptados para el proyecto Europeo de Radiodifusión Digital y con las mismas perspectivas para los proyectos de Teledifusión Digital.

Hoy en día se dispone de los primeros circuitos integrados a muy alta escala de integración (VLSI) que permiten construir sistemas de transmisión digital que facilitan tasas de

error en usuario de  $10^{-7}$  con relaciones señal-ruido de entrada de los receptores de 3 dB. Dado que la investigación en este campo se está llevando a cabo

por muchos equipos científicos/ingenieros, ya se están alcanzando en algunos diseños (probados en simulación mediante ordenador) especificaciones técnicas que bordean los límites teóricos previstos por Shannon en toda transmisión digital: razones señal-ruido de

0,5dB para una probabilidad de error en el bit (tasa de error en usuario) de  $10^{-5}$ .

### Bibliografía

[1] C. BERROU, A. GLAVIEUX, P. THITIMAJSHIMA, *Near Shannon Limit Error-Correcting Coding And Decoding: Turbo Codes (1)*, Proceedings ICC'93 Geneve, Suiza, mayo 1993, pp. 1064-1070

[2] S. BENEDETTO, G. MONTORSI, *Design of Parallel Concatenated Convolutional Codes*, IEEE Transactions on Communications, mayo 1996, Vol. 44 n°5, pp. 591-600

[3] J. HAGENAUER, P. HOEHER, *A Viterbi Algorithm with Soft-Decision Outputs and its Applications*, Proceedings of GLOBECOM'89, Dallas, Texas, noviembre 1989, pp. 47.1.1-47.1.7

[4] S. BENEDETTO, D. DIVSALAR, G. MONTORSI, F. POLLARA, *Continuous MAP Algorithms and their Applications to Decode Parallel and Serial Code Concatenations*, Fifth ESA International Workshop on Digital Signal Processing Techniques Applied to Space Communications, Sitges (Barcelona), 25-27 septiembre 1996, pp. 8.10-8.24

[5] JUAN DARÍO CAPILLAS DIOSDADO, *La Radiodifusión Digital y el OFDM*, Revista Buran, abril 1996, año 3 n°7, pp. 53-56

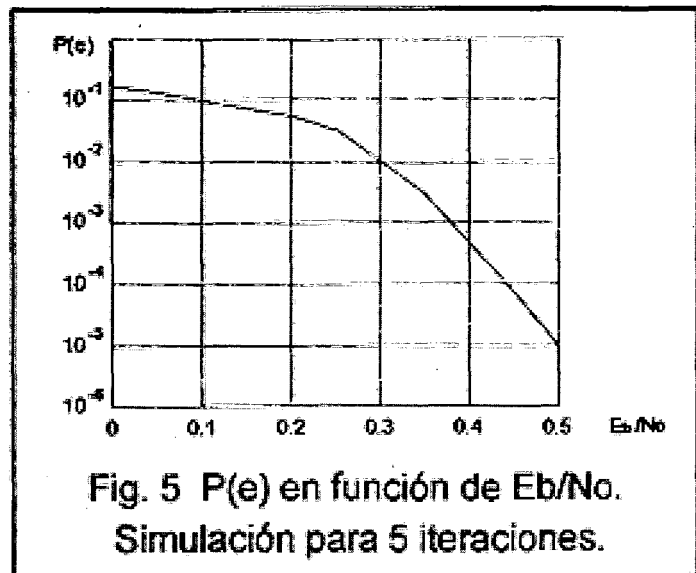


Fig. 5  $P(e)$  en función de  $E_b/N_0$ . Simulación para 5 iteraciones.