

CAPÍTULO 4

ESTUDIO DE LOS TURBO-CÓDIGOS UTILIZADOS EN LOS ESTÁNDARES DE TELEFONÍA CELULAR DE 3G

4.1. Introducción.

El rápido desarrollo de las telecomunicaciones móviles fue una de las más notables historias de éxito en los años 90's. Las redes de segunda generación (2G) comenzaron su operación al inicio de esa década (la primer red GSM fue inaugurada en 1991 en Finlandia), y desde entonces se expandieron y evolucionaron progresivamente. Como ejemplo, hacia agosto del año 2000, había 372 redes GSM operando alrededor del mundo, dando servicio a 361.7 millones de suscriptores [KOR01].

A finales del siglo XX, las comunicaciones móviles se caracterizaban por un diverso conjunto de aplicaciones que utilizaban muchos estándares distintos e incompatibles. Surgió, entonces, la necesidad – o el deseo – de unificar dichos estándares y aplicaciones en un único estándar mundial, de tercera generación (3G); de este modo, se lograría el objetivo de convertir a las comunicaciones móviles en verdaderas comunicaciones personales.

El Sector de Radiocomunicación de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU-R) definió, entonces, los requerimientos para los sistemas de radio móviles de 3G, surgiendo así lo que primero se denominó *Sistema Futuro de Telecomunicaciones Móviles, Públicas y Terrestres* (FPLMTS, por sus siglas en Inglés), y posteriormente *Telecomunicaciones Móviles Internacionales para el año 2000* (IMT-2000, por sus siglas en Inglés) [STE99]. Dichos requerimientos incluían la capacidad de ofrecer a los usuarios un amplio conjunto de servicios de telecomunicaciones, incluyendo voz, multimedia, video,

Internet, transmisión de datos a bajas y altas tasas de transmisión, y todo a través de un conjunto de terminales móviles, capaces de operar en ambientes tanto públicos como privados (áreas de oficina, áreas residenciales, medios de transporte, etcétera) [A.CHA].

Con este objetivo en mente, la Unión Internacional de Telecomunicaciones convocó a distintos comités sobre estándares, en Europa, Estados Unidos, Japón y Corea del Sur; sin embargo, a pesar de que las cuatro regiones decidieron adoptar la tecnología WCDMA (al lector interesado en conocer más sobre esta tecnología de múltiple acceso, le sugerimos consultar [BOS02] [KOR01] [STE99]), cada una propuso su propio estándar. De acuerdo con [T.VAL99], el Instituto Europeo de Estándares de Telecomunicaciones, en Europa (ETSI, por sus siglas en Inglés), la Asociación de Negocios e Industrias de Radio, en Japón (ARIB, por sus siglas en Inglés), y la Asociación de Tecnología de Telecomunicaciones, en Corea del Sur (TTA, por sus siglas en Inglés), propusieron estándares muy semejantes, mientras que la Asociación de la Industria de las Telecomunicaciones, en Estados Unidos (TIA, por sus siglas en Inglés) propuso un estándar denominado *cdma2000*.

Debido a la semejanza existente entre los estándares propuestos por el ETSI, la ARIB, y la TTA, el *Third Generation Partnership Project* (3GPP) decidió unificar estos estándares en un único estándar denominado *Universal Mobile Telecommunications System* (UMTS) (ó WCDMA, como también se le conoce actualmente) [A.CHA], y a finales de 1999 produjo la primera versión completa del nuevo estándar[A.LAI]. Mientras tanto, el *Third Generation Partnership Project 2* (3GPP2) se encargó de estandarizar a *cdma2000*.

Ambos estándares de 3G, UMTS y *cdma2000*, satisfacen la mayoría de los requerimientos definidos por la ITU-R para los sistemas de radio móviles de tercera generación, sin embargo, lograr tal desempeño no es tarea fácil... Debido al amplio desarrollo y gran popularidad que han adquirido los servicios inalámbricos, el número de

usuarios móviles se ha incrementado de manera dramática en los últimos años, lo que conlleva a la imperiosa necesidad de hacer un uso lo más eficientemente posible del espectro disponible. Así mismo, el tráfico de información multimedia requiere de tasas de transmisión y de un ancho de banda mucho mayores, que los requeridos para transmitir señales de voz, además de que la información multimedia es mucho más sensible a los errores producidos durante su transmisión por el canal. Finalmente, si lo que queremos es proveer servicios de transmisión multimedia en tiempo real, una transmisión rápida y libre de errores se convierte en una prioridad.

Como podemos notar, es evidente la necesidad que tienen los sistemas inalámbricos de 3G, de utilizar técnicas eficientes de transmisión y recepción de información. La ganancia de codificación extra (con respecto a otros esquemas de codificación del canal) que ofrecen los Turbo-códigos, permite la posibilidad de conseguir una transmisión que sea tanto rápida (tasas de transmisión cercanas a la capacidad del canal) como confiable. Así mismo, de acuerdo con [A.LEVI], la ganancia de codificación de este esquema FEC también puede utilizarse en los dispositivos inalámbricos para reducir la fuerza de sus señales, lo que permite que más dispositivos puedan compartir el mismo espectro de frecuencia al reducirse la interferencia *inter-dispositivo*. Por si esto fuera poco, los Turbo-códigos ofrecen la posibilidad de enviar la misma cantidad de información, pero empleando únicamente la mitad del ancho de banda [BAR04]. Resulta evidente, entonces, el por qué los sistemas de radio móviles de 3G adoptaron a este esquema de codificación para control de errores como parte de su estándar.

En este capítulo, estudiaremos los Turbo-códigos utilizados por los estándares UMTS y cdma2000. Estudiar las características propias de dichos estándares va más allá de los objetivos de esta tesis, por lo que al lector interesado en esta temática se le sugiere

consultar las páginas web del *Third Generation Partnership Project* (3GPP y 3GPP2), dadas en las referencias [I.3GPP] [I.3GPP2].

En nuestro caso, bastará con saber que en ambos estándares, de acuerdo con [I.3GPP] [I.3GPP2], las especificaciones técnicas para el control de errores en la Capa Física incluyen tanto a los Códigos Convolutivos como a los Turbo-códigos: los primeros utilizados en canales de voz y control, y los segundos utilizados, mayormente, en canales de transferencia de datos (como información multimedia), aunque también se considera su uso en algunos canales de control.

El hecho de que los Turbo-códigos no hayan sido considerados para ser utilizados en los canales de voz, es debido al ligero retardo que presenta el Turbo-decodificador al emplear, éste, un proceso de decodificación iterativo; resulta obvio que la transmisión de voz en un sistema de comunicaciones móviles debe realizarse en tiempo real. Sin embargo, este retardo es tan pequeño que no representa problema alguno para el caso de transmisiones de datos; por el contrario, este esquema de codificación resultó ser una excelente opción para la transmisión de contenido multimedia, pues este tipo de transmisión, como se mencionó anteriormente, requiere de tasas de transmisión elevadas y de un buen nivel de confiabilidad (una BER baja).

Además, como se mencionó en el capítulo anterior, el rápido desarrollo de nuevas tecnologías ha permitido la implementación de Turbo-decodificadores muy rápidos, cuyos tiempos de retardo suelen ser muy pequeños, del orden de microsegundos; esto seguramente dará lugar a que los Turbo-códigos sean considerados próximamente para aquellas aplicaciones en las que los retardos de decodificación, por arriba de cierto umbral, son simplemente inaceptables.

4.2. El Turbo-código utilizado en UMTS.

4.2.1. El Turbo-codificador.

De acuerdo con [I.3GPP], el codificador Turbo utilizado por el estándar de comunicaciones móviles, UMTS, consiste en una concatenación paralela de dos codificadores RSC, cuya

matriz de función de transferencia está dada por $G(D) = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1+D+D^3}{1+D^2+D^3} \end{bmatrix}$, idénticos al

mostrado en la siguiente Figura:

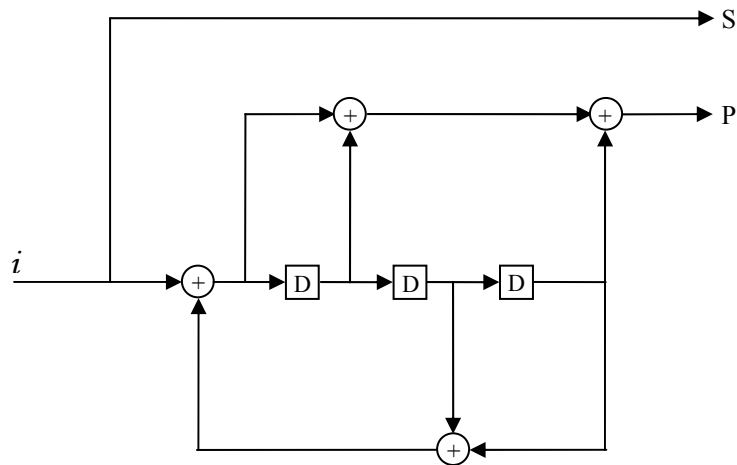


Figura 4.1. Codificador RSC empleado por el Turbo-codificador UMTS.

Siguiendo la estructura presentada en la Figura 3.1 de esta tesis, obtenemos la estructura del Turbo-codificador UMTS:

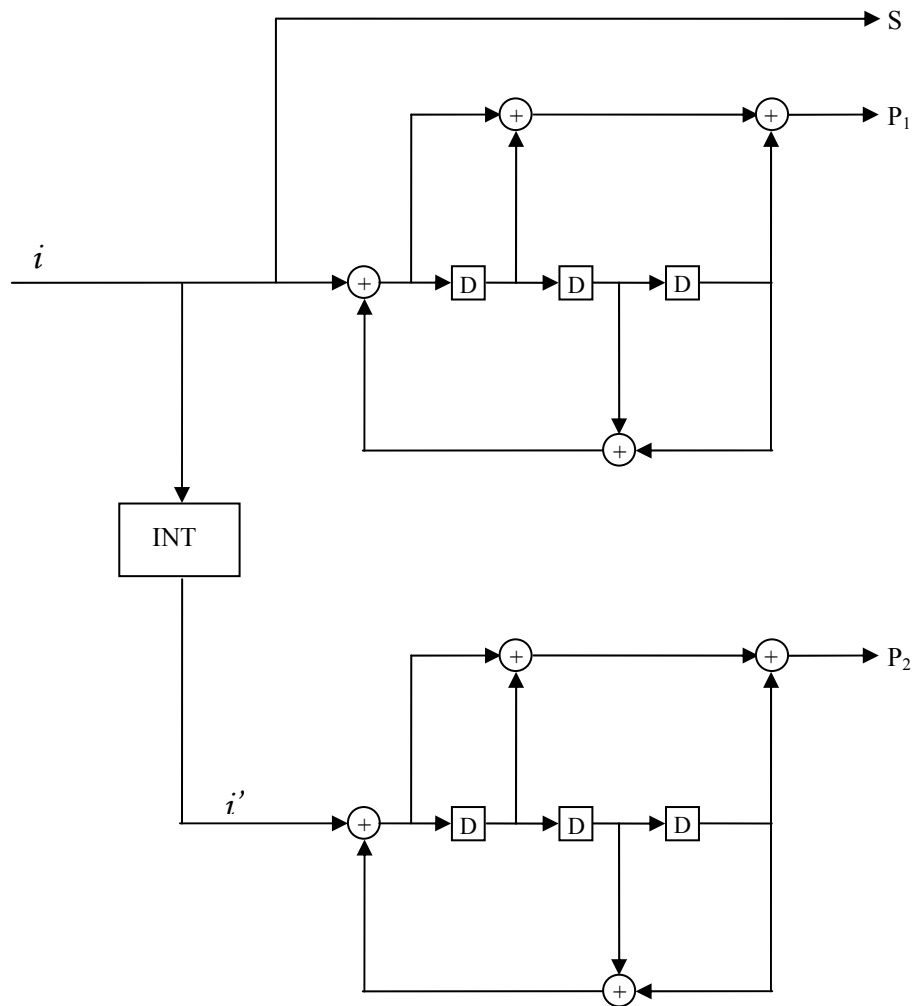


Figura 4.2. Turbo-codificador UMTS.

Como se puede observar, la salida del Turbo-codificador UMTS es una combinación en serie de los bits sistemáticos (s), los bits de paridad producidos por el primer codificador RSC (p_1), y los bits de paridad producidos por el segundo codificador RSC (p_2) (ver ecuación 3.1). De este modo, podemos ver claramente que este codificador Turbo posee una tasa $r = 1/3$.

4.2.2. El Interleaver.

El tamaño del bloque de información k , y por consiguiente del Interleaver, puede variar desde 40 bits hasta 5114 bits.

El Interleaver consiste en una matriz que puede tener 5, 10 ó 20 renglones, y entre 8 y 256 columnas, dependiendo del tamaño del bloque de información k . La información es vaciada en el Interleaver renglón por renglón, con el primer bit de información colocado en la esquina superior izquierda de la matriz.

Una vez que ha sido vaciado todo el bloque de información en la matriz, se efectúan una serie de permutaciones dentro de cada renglón de la matriz, con base en un algoritmo complejo cuya descripción puede ser consultada en [I.3GPP]. Posteriormente, se efectúan una serie de permutaciones “inter-renglón” (entre renglones), de forma tal que se cambie el orden de los renglones, pero sin alterar el orden de los elementos dentro de cada renglón. Cuando la matriz tiene 5 o 10 renglones, la permutación “inter-renglón” únicamente consiste en una reflexión del orden de los renglones con respecto al renglón del centro; por ejemplo, para el caso de una matriz de cinco renglones, los renglones $\{1, 2, 3, 4, 5\}$ se convierten en los renglones $\{5, 4, 3, 2, 1\}$, respectivamente. Si la matriz cuenta con 20 renglones y se cumple que $2281 \leq k \leq 2480$ ó $3161 \leq k \leq 3210$, los renglones $\{1, 2, \dots, 20\}$ se convierten en los renglones $\{20, 10, 15, 5, 1, 3, 6, 8, 13, 19, 17, 14, 18, 16, 4, 2, 7, 12, 9, 11\}$, respectivamente; de otro modo, los renglones quedan convertidos en los renglones $\{20, 10, 15, 5, 1, 3, 6, 8, 13, 19, 11, 9, 14, 18, 4, 2, 17, 7, 16, 12\}$, respectivamente.

Finalmente, la información es leída del Interleaver columna por columna, comenzando por el bit de información ubicado en la esquina superior izquierda de la matriz transformada.

4.2.3. El Turbo-decodificador.

El proceso de decodificación Turbo empleado por el estándar UMTS, es exactamente igual al analizado en la sección 3.3.1 de esta Tesis, y por consiguiente el decodificador Turbo que se utiliza es igual al mostrado en la Figura 3.6 de dicha sección.

4.2.4. Desempeño del Turbo-código UMTS.

En esta sección, se ilustra el desempeño ofrecido por el Turbo-código utilizado en UMTS y el efecto que produce en dicho desempeño el variar algunos de sus parámetros, como son: el número de iteraciones empleadas en el proceso de decodificación, el tamaño del bloque de información k (ó del Interleaver), y el algoritmo de decodificación SISO utilizado. Esto lo haremos a través de un conjunto de gráficas de BER vs E_b/N_o obtenidas en [A.VAL], luego de simular dicho Turbo-código para un canal AWGN, empleando una modulación BPSK.

La siguiente figura, nos muestra el efecto que produce en la curva de desempeño del Turbo-código UMTS el variar el número de iteraciones utilizado en el proceso de decodificación Turbo, empleando el algoritmo de decodificación SISO log-MAP, y un tamaño de bloque de información $k = 1530$ bits.

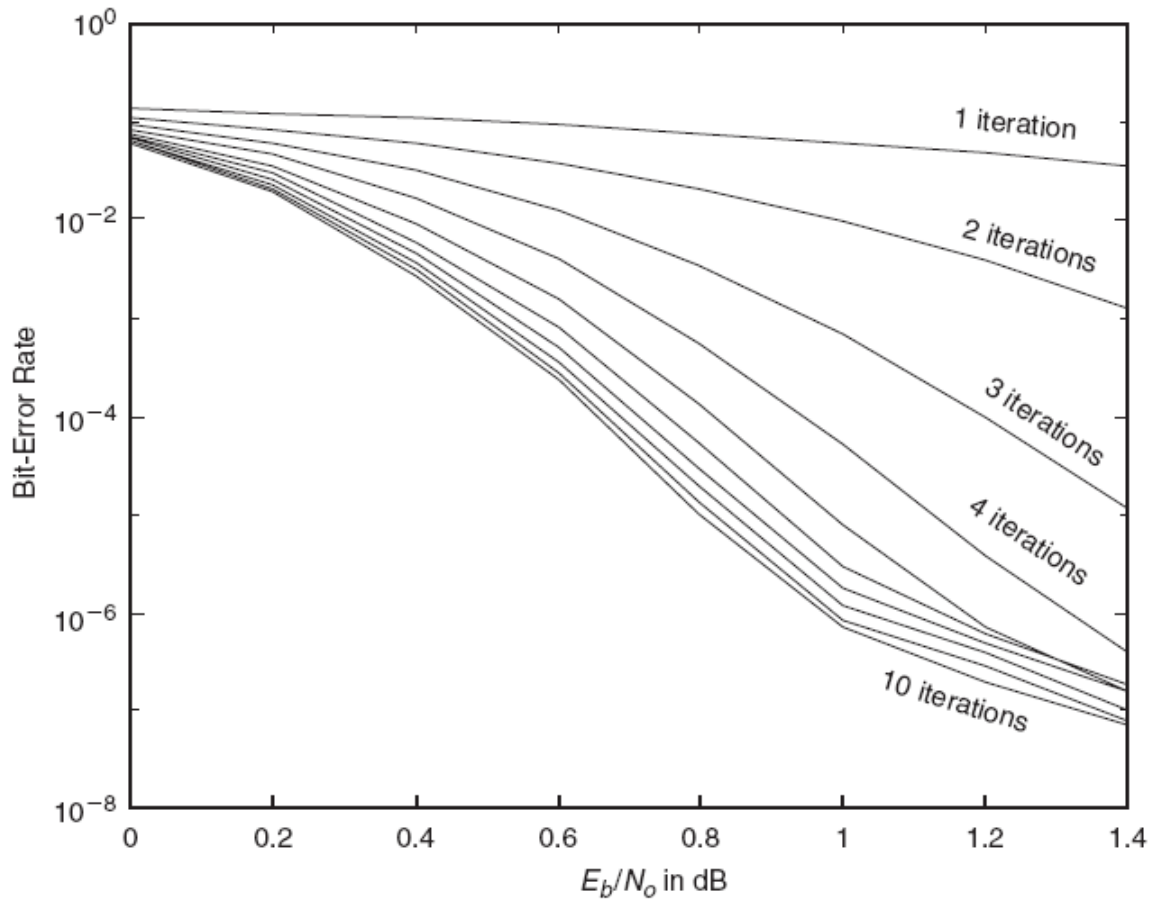


Figura 4.3. Desempeño del Turbo-código UMTS en función del número de iteraciones. [A.VAL].

Podemos apreciar, claramente, como el desempeño del Turbo-código mejora conforme se incrementa el número de iteraciones en el Turbo-decodificador, de forma tal que después de 10 iteraciones, es capaz de alcanzar una $BER = 10^{-5}$ a una E_b/N_o de tan sólo 0.8 dB. Esto concuerda con lo estudiado en la sección 3.4.2 de esta Tesis (ver Figura 3.11).

A continuación, mostramos el desempeño del Turbo-código UMTS en función del tamaño del bloque de información k (ó del Interleaver). Para estas simulaciones, se utilizaron 14 iteraciones en el proceso de decodificado, y un algoritmo de decodificación SISO log-MAP.

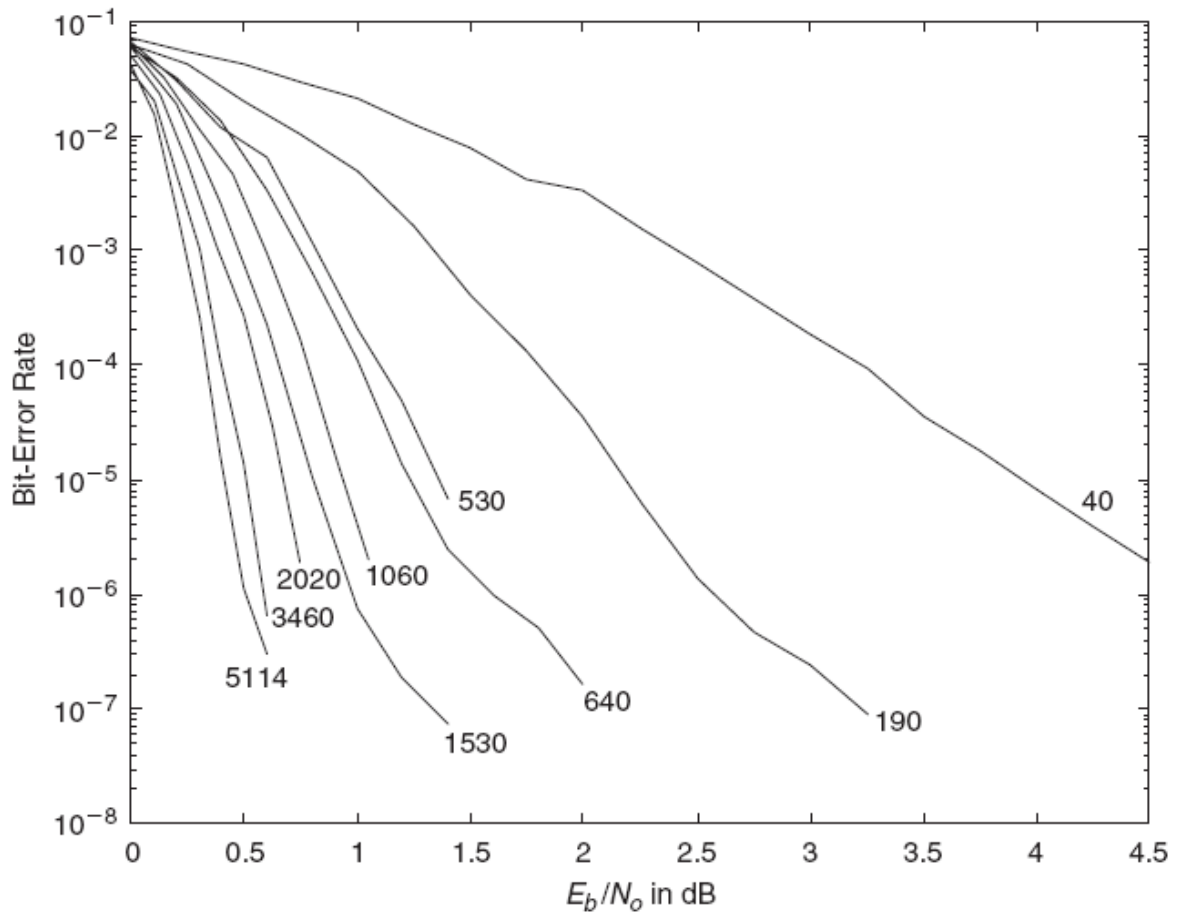


Figura 4.4. Desempeño del Turbo-código UMTS en función del tamaño del Interleaver. [A.VAL].

Como se puede apreciar, el desempeño del Turbo-código mejora considerablemente conforme el tamaño del bloque de información, k , se incrementa, lo cual reafirma lo estudiado en la sección 3.4.1 de esta Tesis.

Es importante notar, a partir de la Figura 4.4, el gran desempeño que este Turbo-código presenta cuando $k = 5114$ bits y se utilizan 14 iteraciones en el proceso de decodificado. Para una BER = 10^{-6} , se requiere una E_b/N_0 de tan sólo 0.5 dB, lo que se traduce en un desempeño que está a tan sólo 1 dB de distancia (aproximadamente) del límite de Shannon, para códigos de tasa $r = 1/3$ (ver sección 3.4, Tabla 3.7). Sin embargo,

tal magnífico desempeño, requerirá de más memoria y un mayor tiempo de decodificado por parte del Turbo-decodificador, tanto por el tamaño del bloque de información, como por el número de iteraciones utilizado, como se estudió en la sección 3.4.1. Esta es la causa por la que los estándares de telefonía celular de 3G prefirieron a los Turbo-códigos para su utilización en canales de transferencia de datos y no de voz, aunque, como podemos observar en la Figura 4.4, para frames cortos ($k = 640$ bits = menor tiempo de decodificación), el Turbo-código UMTS es capaz de proveer una $BER = 10^{-5}$ empleando una SNR por bit de información de tan sólo 1.3 dB, aproximadamente; su desempeño sigue siendo muy bueno de cualquier forma.

Finalmente, mostramos a continuación el desempeño del Turbo-código UMTS en función del algoritmo de decodificación SISO utilizado por el Turbo-decodificador. Para estas simulaciones, se utilizaron 14 iteraciones en el proceso de decodificado, y un tamaño del bloque de información $k = 5114$ bits.

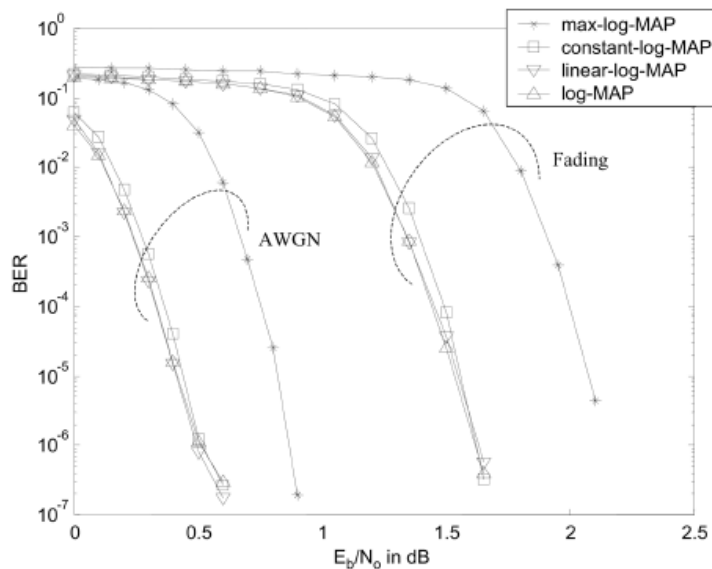


Figura 4.5. Desempeño del Turbo-código UMTS en función del algoritmo SISO usado. [A.VAL].

En la Figura, se pueden apreciar dos conjuntos de curvas de desempeño, de los cuáles únicamente nos debemos fijar en el producido por las simulaciones realizadas para un canal AWGN (marcado en la figura como “AWGN”). Los algoritmos de decodificación SISO principales que se utilizaron para estas simulaciones, son el algoritmo log-MAP y max-log-MAP. Los algoritmos linear-log-MAP y constant-log-MAP son simplemente variaciones del algoritmo log-MAP que no producen mayores efectos, por lo que no fueron consideradas para esta Tesis (al lector interesado en estas versiones del algoritmo SISO log-MAP, le sugerimos consultar [A.VAL]). Nótese, pues, cómo de acuerdo con lo estudiado en la sección 3.4.2 de esta Tesis, efectivamente la utilización del algoritmo max-log-MAP, en el proceso de decodificación, degrada notablemente el desempeño del Turbo-código UMTS. Es por esto que en este estándar de 3G se decidió implementar el algoritmo log-MAP para el proceso de Turbo-decodificación [I.3GPP].

4.3. El Turbo-código utilizado en cdma-2000.

4.3.1. El Turbo-codificador.

De acuerdo con [I.3GPP2], el codificador Turbo utilizado por el estándar de comunicaciones móviles, cdma2000, consiste en una concatenación paralela de dos codificadores RSC, cuya matriz de función de transferencia está dada por

$$G(D) = \left[1 \quad \frac{1+D+D^3}{1+D^2+D^3} \quad \frac{1+D+D^2+D^3}{1+D^2+D^3} \right], \text{ idénticos al mostrado en la siguiente Figura:}$$

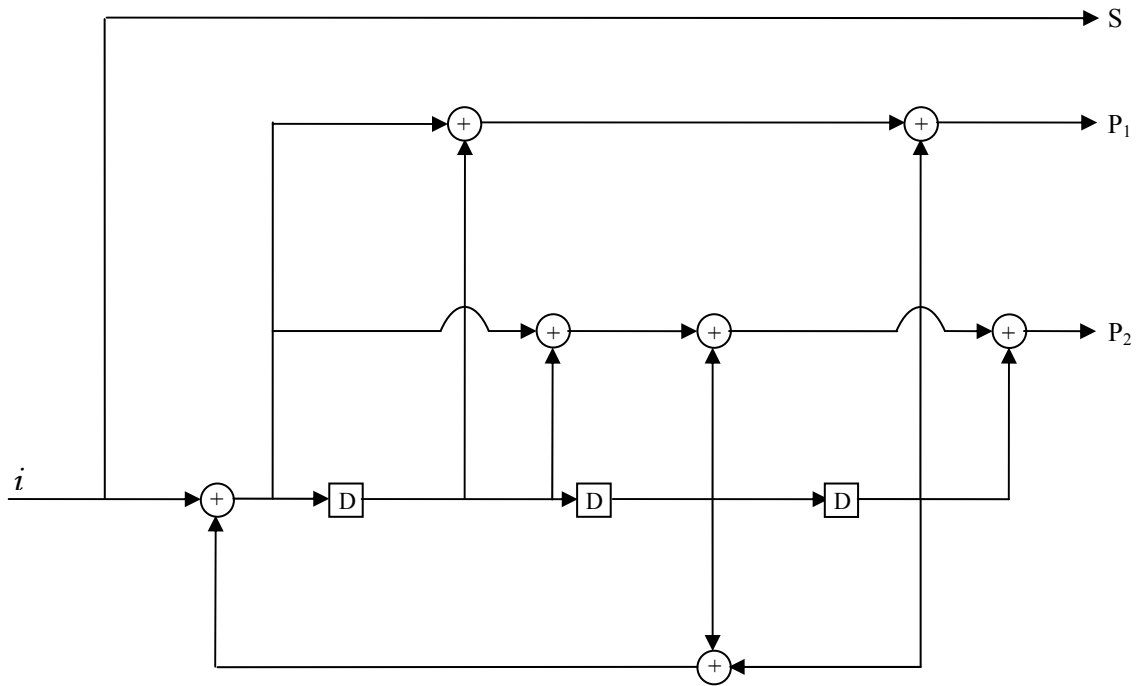


Figura 4.6. Codificador RSC empleado por el Turbo-codificador cdma2000.

Siguiendo la estructura presentada en la Figura 3.1 de esta tesis, obtenemos la estructura del Turbo-codificador cdma2000:

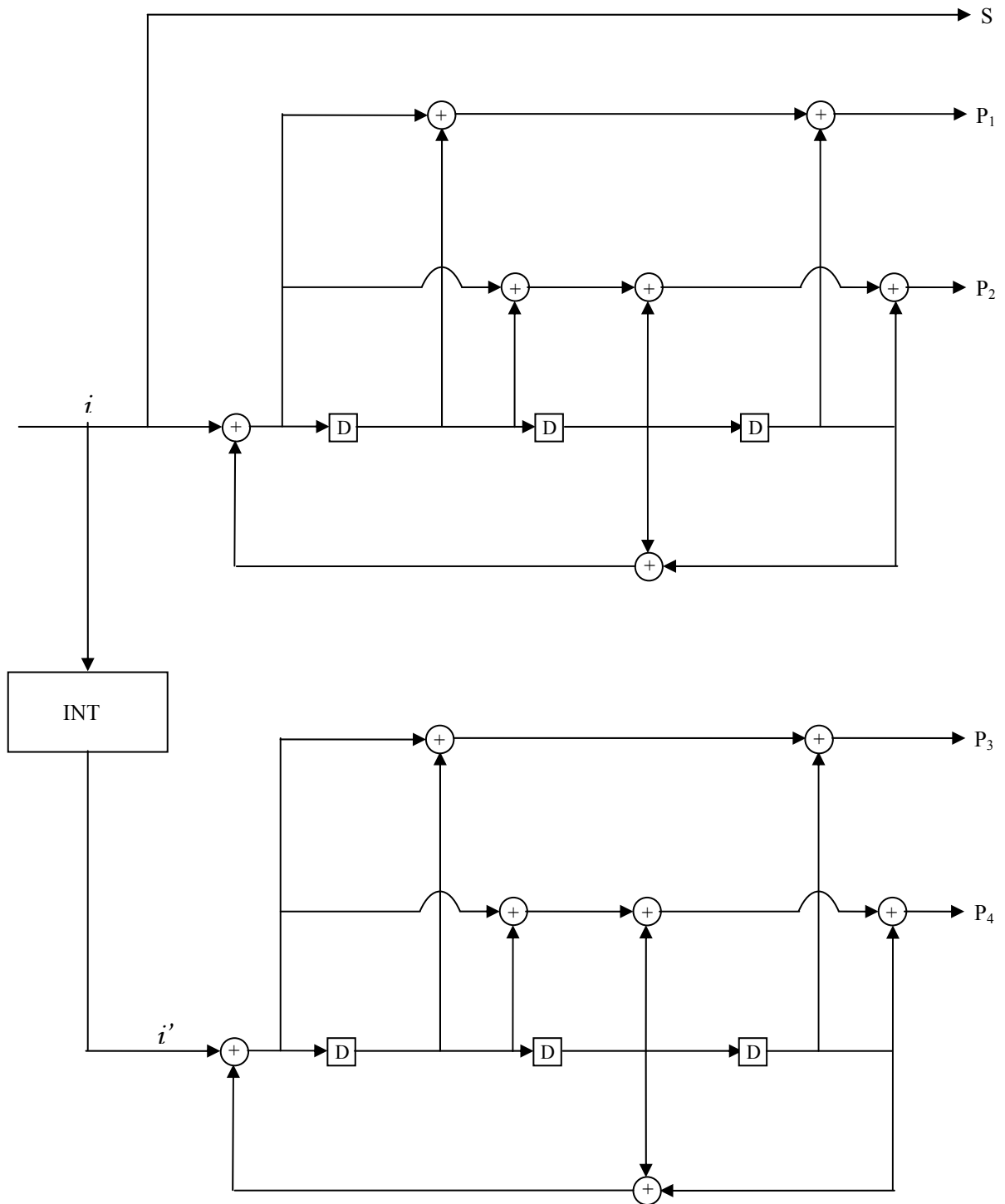


Figura 4.7. Turbo-codificador cdma2000.

Como se puede observar, cada uno de los codificadores RSC que forman al Turbo-codificador cdma2000 posee una tasa $r = 1/3$, sólo que la parte sistemática del codificador RSC inferior se ha eliminado para formar al Turbo-codificador. De este modo, por cada bit de información que ingrese al Turbo-codificador, éste producirá un total de cinco bits codificados (el bit sistemático, y cuatro bits de paridad producidos por los codificadores componentes), dando por resultado una tasa del codificador Turbo igual a $r = 1/5$.

La salida del Turbo-codificador cdma2000 es una combinación en serie de los bits sistemáticos (s), los bits de paridad producidos por el primer codificador RSC ($p1$ y $p2$), y los bits de paridad producidos por el segundo codificador RSC ($p3$ y $p4$), resultando la secuencia siguiente: **salida** = $(s^{(1)}, p_1^{(1)}, p_2^{(1)}, p_3^{(1)}, p_4^{(1)}, s^{(2)}, p_1^{(2)}, p_2^{(2)}, p_3^{(2)}, p_4^{(2)}, \dots, s^{(k)}, p_1^{(k)}, p_2^{(k)}, p_3^{(k)}, p_4^{(k)})$, donde k corresponde al tamaño del bloque de información (ó del Interleaver).

Sin embargo, una tasa del codificador Turbo de $r = 1/5$ resulta indeseable para muchas aplicaciones, principalmente por el incremento en el ancho de banda de transmisión que se requiere (ver última parte de la sección 1.3). Por ello, el Turbo-codificador cdma2000 incluye en su implementación el mecanismo denominado *puncturing* para lograr tasas de código más altas (ver sección 3.2.1.1). Mediante este mecanismo, este codificador Turbo puede ofrecer tasas de código r de $1/2$, $1/3$ y $1/4$. Como ejemplo interesante de esto, para lograr una tasa $r = 1/3$, el codificador Turbo no toma en cuenta la segunda salida de paridad de cada codificador RSC ($p2$ y $p4$), y como se podrá observar en la Figura 4.7, el “eliminar” las salidas de paridad $p2$ y $p4$ del Turbo-codificador cdma2000 resulta en el Turbo-codificador UMTS, sólo que con un Interleaver distinto. Esto nos puede orillar a

pensar, de manera acertada (como veremos más adelante), que el desempeño ofrecido por el Turbo-código UMTS y el Turbo-código cdma2000, de tasa $r = 1/3$, es casi el mismo.

4.3.2. El Interleaver.

El tamaño del bloque de información k , y por consiguiente del Interleaver, debe tener uno de los siguientes valores específicos: 378, 570, 762, 1146, 1530, 2398, 3066, 4602, 6138, 9210, 12282, ó 20730 bits.

El Interleaver utilizado en cdma2000 consiste en una estructura especial, denominada *S-random Interleaver* (Interleaver “S-aleatorio”). La idea de este Interleaver, consiste en evitar que los bits sean escritos en posiciones vecinas dentro de una misma ventana de tamaño S . Entre más grande sea S , el Turbo-decodificador tendrá un mejor desempeño. El procedimiento de este Interleaver es el siguiente: la información es vaciada en el Interleaver en un único renglón de tamaño k . Posteriormente, se selecciona un bit de manera aleatoria y su posición, dentro del Interleaver, es comparada con la posición que tenían los S bits que salieron del Interleaver previamente, de forma tal que el bit en consideración saldrá del Interleaver, si y sólo si su ubicación está a una distancia mayor a S posiciones de cualquiera de las ubicaciones antiguas de los S bits previamente aceptados. El parámetro S se define en base a un algoritmo que está en función del tamaño k del Interleaver, y su descripción puede ser consultada en [I.3GPP2]. Este procedimiento es repetido hasta que el Interleaver queda vacío.

4.3.3. El Turbo-decodificador.

Al igual que en el estándar UMTS, el proceso de decodificación Turbo empleado por el estándar cdma2000 es exactamente igual al analizado en la sección 3.3.1 de esta Tesis, y

por consiguiente el decodificador Turbo que se utiliza es igual al mostrado en la Figura 3.6 de dicha sección.

4.3.4. Desempeño del Turbo-código cdma-2000.

En esta sección, se ilustra el desempeño ofrecido por el Turbo-código utilizado en cdma2000 y el efecto que produce en dicho desempeño el variar su tasa de código r . Recordemos que, mientras que el Turbo-código de UMTS tenía una tasa r fija, igual a $1/3$, el Turbo-código utilizado en cdma2000 posee una tasa de código r variable. Tal desempeño y el efecto que produce en éste la variación de la tasa de código, se muestran en la siguiente Figura, consistente en una gráfica de BER vs E_b/N_o obtenida en [T.VAL99], luego de simular el Turbo-código cdma2000 para un canal AWGN, empleando una modulación BPSK, $k = 1530$ bits de información, y 14 iteraciones en el proceso de decodificado.

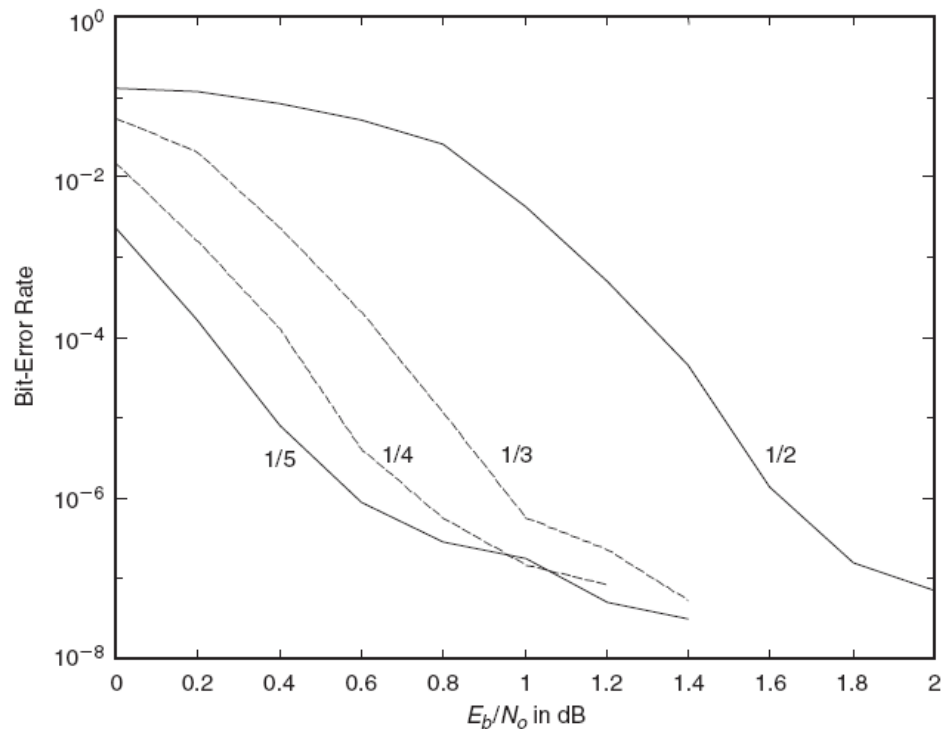


Figura 4.8. Desempeño del Turbo-código cdma2000 en función de su tasa de código. [T.VAL99].

Como podemos ver, el desempeño del Turbo-código mejora notablemente conforme su tasa de código se decrementa, lo cual reafirma lo estudiado en la sección 3.4 de esta Tesis. En general, cualquier esquema para control de errores FEC presenta un efecto similar en su desempeño; esto se debe a que, mientras más baja sea la tasa de un código, más bits de paridad son enviados para proteger la información.

Nótese como, efectivamente, como se mencionó líneas atrás, el desempeño ofrecido por el Turbo-código UMTS y el Turbo-código cdma2000, de tasa $r = 1/3$, es casi el mismo (compárese con la Figura 4.4, para el caso en que $k = 1530$ bits). Esto es lógico, pues en este caso ambos Turbo-codificadores son esencialmente iguales, excepto por el diseño del Interleaver, que, cómo se podrá ver, no produce una variación notable entre ambas curvas, por lo que podemos afirmar que tanto el Interleaver de cdma2000, como el Interleaver de UMTS, ofrecen un buen desempeño en sus respectivos Turbo-códigos.

4.4. Conclusiones del capítulo.

En este Capítulo, se estudiaron los Turbo-códigos adoptados por los estándares de comunicaciones móviles de Tercera Generación: UMTS y cdma2000. Dichos estándares cumplen con los requerimientos para los sistemas de radio móviles de 3G, establecidos por la ITU-R; sin embargo, esto impone a ambos estándares la fuerte necesidad de utilizar técnicas eficientes de transmisión y recepción de información, debido a la enorme demanda que hoy en día existe de los servicios de comunicaciones móviles y al reducido espectro con el que se cuenta para esos servicios.

Los Turbo-códigos resultaron ser una opción muy atractiva para formar parte de estos estándares, pues la ganancia de codificación tan importante que presentan, brinda la posibilidad de transmitir información a tasas muy elevadas, cercanas a la capacidad del canal, y con un muy buen nivel de confiabilidad ($BER \approx 10^{-6}$). Así mismo, brinda la posibilidad de que los dispositivos móviles reduzcan sus niveles de potencia de transmisión, y por consiguiente, de que un mayor número de usuarios pueda compartir el mismo espectro de frecuencia. De este modo, las ventajas que ofrecía el utilizar este esquema de codificación del canal, en un sistema de comunicaciones móviles de 3G, simplemente no podían ser desaprovechadas.