

# CAPÍTULO 5

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES PARA TRABAJO FUTURO

Los Turbo-códigos representan el final de una búsqueda que duró más de cuarenta años. Los tantos intentos fallidos por encontrar un esquema de codificación que fuera capaz de acercarse a los límites teóricos descubiertos por el matemático Claude E. Shannon, acabaron por agotar a los investigadores de este campo de las Matemáticas y la Electrónica.

Desde los códigos Hamming, los códigos Reed-Solomon, los códigos de Bloque en general, hasta los códigos Convolucionales, todos, sin excepción, incluso los más poderosos, fallaron en su intento de traspasar la enorme barrera de la complejidad que imponía el tener que decodificar palabras de código tan complejas como para lograr acercarse lo más posible a los límites de Shannon. ¿Cuál sería la solución a este problema?. “No existe”, algunos investigadores concluyeron a finales de la década de los 70’s.

Fue la aplicación de un concepto tan importante y utilizado en Electrónica, pero tan olvidado en el campo del control de errores, el que contradecía esa afirmación tan errónea de que la gran barrera de la complejidad en el proceso de decodificación nunca podría ser superada... Nos referimos al concepto de la *retroalimentación*. La innovadora y revolucionaria técnica de la decodificación iterativa, que dio origen a los Turbo-códigos, fue la respuesta a las peticiones de los investigadores de superar esa famosa barrera de la complejidad.

El presente trabajo está elaborado con toda la intención de que sus lectores conozcan a fondo todo lo concerniente a esta revolucionaria técnica de codificación para el control de errores, pues más que una nueva técnica de codificación, representa un parte-

aguas en el mundo de las comunicaciones digitales, tan imprescindibles en un mundo como el que hoy vivimos. ¿Por qué un parte-aguas?, simplemente porque los Turbo-códigos representan la respuesta fehaciente a las predicciones de Shannon, acerca de la posibilidad de lograr transmitir a una velocidad igual a la capacidad del canal, con un mínimo de errores, y empleando un mínimo de energía por bit de información para transmitir... ¡una transmisión *óptima!*, en una palabra.

En el primer Capítulo de este trabajo hemos estudiado, de manera detallada, los principales conceptos relacionados con la Teoría de la Información y la correspondiente Teoría de la Codificación, así como los conceptos más importantes acerca de un sistema de comunicación digital. Esto nos permitió adentrarnos, con esos conocimientos en mente, al campo de la Codificación para el Control de Errores, y en particular, al área relacionada con los denominados Códigos Convolucionales. De este modo, en el segundo Capítulo se estudió a fondo toda la teoría concerniente a la codificación Convolutiva, pues este tipo de codificación representa la base de los Turbo-códigos.

El tercer Capítulo representa el corazón del presente trabajo. En él, pudimos estudiar lo más importante, de una manera muy detallada y concreta, acerca del vasto mundo del conocimiento, que hoy en día existe, sobre la revolucionaria técnica de codificación del canal, denominada “Turbo-códigos”.

Se estudiaron en él, las principales arquitecturas que puede presentar el Turbo-codificador, siendo la más importante de ellas – y por ende, en la que está basado este trabajo – la arquitectura conocida como PCCC (por sus siglas en inglés de *Parallel Concatenated Convolutional Codes*), al ser ésta la más empleada por la gran mayoría de las aplicaciones que utilizan a los Turbo-códigos y, en particular, por los estándares de

telefonía móvil de 3G, que nos permitieron resaltar la importancia de este nuevo esquema de codificación, al haber sido incluido este último en ellos.

Se estudió, así mismo, el elemento tan importante para este esquema, conocido como Interleaver, pero, sobre todo, se puso especial énfasis en el estudio y análisis de todo lo concerniente a lo que es la decodificación Iterativa, pues representa la parte realmente innovadora y, sobre todo, revolucionaria, dentro del campo de la codificación para el control de errores. Este tipo de decodificación, ofrece un desempeño muy similar al que ofrece un algoritmo de decodificación de máxima probabilidad (MLDA), con la diferencia de que es capaz de procesar palabras de código muy largas, pero con una complejidad en su implementación no prohibitiva; ¡la solución a un problema que había permanecido sin respuesta durante años!.

De este modo, pudimos analizar a través de gráficos de BER vs  $E_b/N_0$  las curvas de desempeño de los Turbo-códigos, percatándonos de que, efectivamente, presentan una importante ganancia de codificación con respecto a los esquemas de codificación anteriores a ellos, lo que se traduce en la posibilidad de transmitir información en una manera que antes sólo existía en teoría, en los textos del gran matemático Shannon. Se analizaron las curvas de desempeño producidas por el efecto de variar algunos parámetros importantes en el esquema de codificación-decodificación de un Turbo-código, y concluimos de esta manera, que el tamaño y diseño del Interleaver, así como el número de iteraciones empleado en el proceso de Turbo-decodificación, son claves en el desempeño que con un Turbo-código puede alcanzarse. Lamentablemente, a mayor tamaño del Interleaver y mayor número de iteraciones utilizados, mayor es el desempeño ofrecido por un Turbo-código, pero mayor será, también, la memoria y el tiempo requeridos por el Turbo-decodificador para producir su secuencia de salida; es por ello que el tamaño del Interleaver y el número

de iteraciones deben elegirse de forma tal que se satisfagan los requerimientos del sistema de BER, tardanza de decodificación y memoria utilizada por el decodificador.

Finalmente, en el cuarto Capítulo, estudiamos los Turbo-códigos utilizados por los estándares de telefonía móvil de 3G: UMTS y cdma2000. Dichos estándares cumplen con los requerimientos estipulados por la ITU-R, de ofrecer al usuario un amplio conjunto de servicios de telecomunicaciones, incluyendo voz, multimedia, video, Internet, y transmisión de datos a bajas y altas tasas de transmisión. Considerando la impresionante demanda que los servicios de comunicaciones móviles han adquirido en los últimos años, y el reducido espectro con el que se cuenta para estos servicios, resulta imprescindible la utilización de técnicas eficientes de transmisión y recepción de información por parte de los sistemas inalámbricos de comunicación. Por el gran desempeño que ofrecen, los Turbo-códigos representaron una respuesta directa a esta necesidad.

El presente trabajo tenía por objetivos primordiales, uno, el introducir al lector a un panorama general del mundo de la codificación para el control de errores, de forma tal que pudiéramos mostrar la enorme importancia que el descubrimiento de los Turbo-códigos trajo consigo dentro de este campo de investigación; y dos, estudiar a fondo esta revolucionaria técnica de codificación, de forma tal que el lector adquiriera los conocimientos más importantes en torno a este tema y así pudiera comprender en su totalidad el por qué los Turbo-códigos han adquirido un impacto tan importante, no sólo en los sistemas de comunicaciones móviles de 3G, sino en diversos campos del mundo de las telecomunicaciones.

De este modo, de haberse cumplido nuestro humilde objetivo, nos encontramos en un punto en el que debemos estar totalmente familiarizados con los conocimientos más importantes en torno a esta nueva y poderosa técnica para el control de errores. Esto brinda

la posibilidad, a los lectores interesados en este campo de investigación, de estudiar más a fondo a los Turbo-códigos, pues esta nueva técnica de codificación, como dijimos anteriormente, representa más que una técnica, un concepto totalmente nuevo dentro del campo de investigación del control de errores, que trae consigo un sin número de vertientes nuevas que vale la pena analizar.

Como ejemplo de esto, y para un posible trabajo futuro, sugerimos a nuestros lectores analizar la arquitectura SCCC, pues como se ha demostrado en [A.DIV], en este tipo de Turbo-código, el *error floor* en su curva de desempeño se produce a un nivel mucho más bajo de BER que en el caso de la arquitectura PCCC. Esto, obviamente, trae grandes ventajas consigo. Así mismo, se sugiere trabajar sobre los denominados *stream-oriented Turbo-codes*, que consisten en un esquema en el que el Turbo-código, en vez de ser utilizado en conjunto como un gran código de Bloque lineal, se utiliza como un gran código Convolutacional. Este tipo de Turbo-código presenta grandes ventajas cuando es aplicado en sistemas de conmutación de circuitos.