

Descripción general de ADSL

A lo largo de este capítulo se describen y estudian los fundamentos de la tecnología Línea Digital de Abonado Asimétrica o ADSL, así como la teoría general de la arquitectura típica de un módem ADSL o *transceiver*. Al final del mismo, se explican brevemente algunas de las limitantes del sistema, como son los diversos tipos de ruidos y errores comunes.

2.1 FUNDAMENTOS DE LA TECNOLOGÍA ADSL

ADSL es una técnica de acceso a Internet de banda ancha que nos permite tener y correr aplicaciones multimedia de gran ancho de banda, tales como video conferencias, video en demanda, video en tiempo real, TV digital, etc. Es una tecnología hecha realidad en muchos hogares y empresas que requieren de acceso a la red de redes a una velocidad muy rápida y en la actualidad, es una de las tecnologías comerciales de acceso a Internet más populares del mundo, esto debido en gran parte a que permite la coexistencia de servicios de telefonía de voz, ISDN (*Integrated Services Digital Network*) y aplicaciones multimedia de banda ancha, todo sobre las líneas telefónicas ordinarias [ERW02a]. Lo anterior se debe a que ADSL opera a frecuencias por encima de las frecuencias de operación de la telefonía estándar sobre el mismo par trenzado, lo que permite servicios simultáneos de voz y datos.

El origen de ADSL se remonta a finales de los años 80's cuando Joseph Lechleider, un investigador de *Bellcore*, propone la idea de una nueva tecnología para soportar tráfico de datos de manera asíncrona que pudiera explotar la naturaleza asíncrona de la mayor parte de las aplicaciones multimedia, donde gran cantidad de información debe fluir hacia el suscriptor (*downstream*) y solo una menor cantidad de información interactiva de control fluye del suscriptor hacia la oficina central [ZHE00]. Esta idea surge como una extensión natural de la tecnología de acceso DSL (*Digital Subscriber Line*), que fue desarrollada en aquellos años para acceder a la Red Digital de Servicios Integrados (ISDN) a una velocidad full dúplex de 160 Kbps.

Los estudios computacionales realizados por Bellcore fueron cedidos a universidades y a compañías fabricantes para refinar la teoría matemática y construir diversos prototipos [KMS95]. Estos trabajos dieron origen a esfuerzos conjuntos para desarrollar estándares internacionales y los resultados fueron positivos al crearse dos estándares: Uno fue creado para Norteamérica por la ANSI (*American National Standards Institute*) bajo el nombre T1.413, en el año de 1995; el otro es una derivación del primero ya que se basa en el núcleo de T1.413, creado por la ITU (*Internacional Telecommunications Union*) en 1997 bajo el nombre de ITU-T G.992.1 para Europa y otros países [BIN00].

Una de las características distintivas de ADSL con respecto a otras tecnologías de acceso a Internet es su asimetría, esto es, la velocidad de transmisión de bajada es mucho mayor que la velocidad de transmisión de subida. Las velocidades que ADSL puede soportar van de 6 a 8 Mbps en el canal de bajada, también conocido como *downstream*, mientras que en el canal de subida o *upstream* soporta hasta un máximo de 640 Kbps. Estas velocidades están especificadas por la ITU G.992.1 y la ANSI T1.413, sin embargo, no son las únicas velocidades estandarizadas. En 1998 surgió la idea de lanzar una versión de ADSL que permitiera un mercado masivo de esta tecnología y a un precio mucho más accesible para las personas, ya que originalmente ADSL fue propuesto para ofrecer Video en Demanda (VoD) en un mercado residencial. La propuesta original falló en un principio debido a la necesidad de grandes inversiones en equipo de video centralizado y al factor

limitante que resultaba el *backbone* de Internet en aquellos años. La nueva propuesta se basó en la premisa de que era innecesario tener altas velocidades de transmisión de datos en la parte del lazo del abonado si aún no eran viables los servicios de VoD y algunos otros servicios multimedia. Es así como nace la versión ADSL *Lite*, cuyo estándar es G992.2 con velocidades de bajadas hasta de 1.5 Mbps y 512 Kbps de subida, con un costo mucho más bajo que la versión ADSL *Full Rate* (G.992.1) [CAR02, RVS01].

En general, la velocidad de transmisión en ADSL depende de las características del lazo de abonado o suscriptor (*Subscriber Loop*), que conecta a un usuario a la oficina central (CO). Cada lazo de abonado consiste de un par de cables de cobre aislados con calibres entre 26 AWG y 19 AWG (*American Wire Gauge*) que equivalen a un rango entre 0.4 mm y 0.91 mm. Una planta de lazos típicamente consiste de un cable alimentador multipar que sale de la oficina central; éste puede contener hasta 50 grupos de cables, cada uno de los cuales puede contener 10, 25 o 50 pares de cobre. En la interfase de distribución (FDI, *Feeder Distribution Interface*) se divide el cable alimentador multipar en varios cables de distribución pequeños (hasta 50 pares), mismos que se dividen en varios pares individuales que son los que finalmente llegan a los usuarios. Dentro de los cables, los dos hilos de cada par están trenzados uno con el otro para formar un par tranzado sin blindaje (UTP, *Unshielded Twisted Pair*). La mayor parte de la infraestructura instalada es UTP categoría 3, ya que ésta es apropiada para la telefonía tradicional; una pequeña porción es categoría 5, apropiado para aplicaciones Ethernet de 100 Mbps. Las Figuras 2.1 y 2.2 muestran estas descripciones gráficamente [BIN00].



Figura 2.1 Par trenzado no blindado.

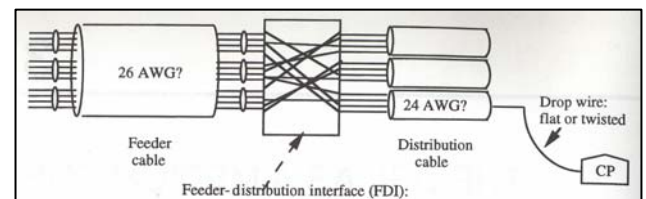


Figura 2.2 Planta de lazos típica

Algunos de los factores que afectan el rendimiento del lazo de abonado son la longitud de la línea, el calibre del cable, la presencia de *bridged taps* (puentes o circuitos abiertos sobre la línea telefónica) y la interferencia por acoplamiento cruzado. A mayor frecuencia y longitud de la línea, las pérdidas se incrementan, mientras que para diámetros de cable mayores, las pérdidas disminuyen. La Tabla 2.1 muestra las velocidades que se alcanzan bajo ciertas características de la línea [URL02].

Tabla 2.1 Características de la línea y velocidad de transmisión [URL02]

Velocidad de transmisión Mbps	Calibre del cable AWG	Distancia ft	Diámetro del cable mm	Distancia Km
1.5 o 2	24	18,000	0.5	5.5
1.5 o 2	26	15,000	0.4	4.6
6.1	24	12,000	0.5	3.7
6.1	26	9,000	0.4	2.7

Para poder estudiar en su totalidad la tecnología ADSL, es menester revisar y definir el modelo de referencia de la arquitectura ADSL, publicado por *DSL Forum* [URL02] (ver Figura 2.3 y Tabla 2.2). Este modelo de referencia es una excelente herramienta para comenzar el estudio de la tecnología ADSL y comprender en que parte de la red de comunicaciones funciona.

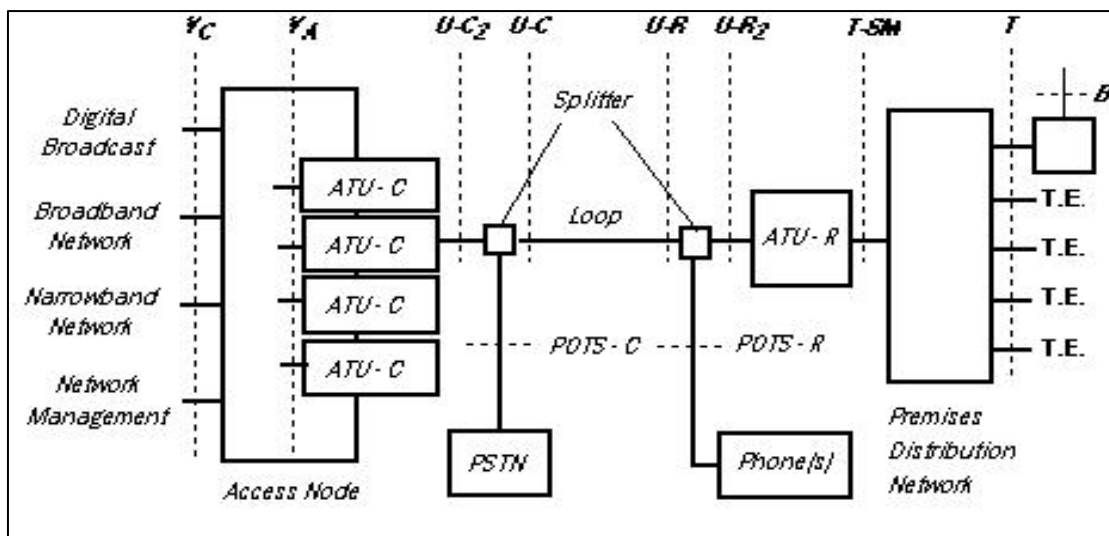


Figura 2.3 Modelo de Referencia del Sistema publicado por DSL Forum [URL02].

Tabla 2.2 Definiciones del modelo de referencia para un sistema ADSL [URL02].

ATU-C:	<i>ADSL Transceiver Unit- Central Office.</i> Unidad de transmisión-recepción ADSL en la oficina central, que puede estar incluida dentro del nodo de acceso.
ATU-R:	<i>ADSL Transceiver Unit – Remote.</i> Unidad de transmisión-recepción ADSL (módem ADSL) remoto del cliente o subcriptor, que puede estar incluida dentro del módulo de servicio.
Access Node:	Nodo de acceso. Punto de concentración para datos de banda ancha y banda angosta. Puede colocarse tanto en la oficina central o en un sitio remoto.
B:	Entrada auxiliar de datos (por ejemplo, de un satélite) al módulo de servicio (por ejemplo, un <i>Set Top Box</i>).
Broadcast:	Entrada de datos de banda ancha en modo simple (típicamente <i>broadcast video</i>).
Broadband Network:	Red de Banda Ancha. Sistema de conmutación para tasas de transmisión de datos por encima de 1.5/2.0 Mbps.
Loop:	Lazo o bucle de la línea telefónica de cobre par tranzado. Los lazos pueden variar en distancia, diámetro, antigüedad y características de transmisión dependiendo de la red.
Narrowband Network:	Red de Banda Angosta. Sistema de conmutación para tasas de transmisión de datos iguales o por debajo de 1.5/2.0 Mbps.
POTS:	Servicio Tradicional de Telefonía (<i>Plain Old Telephone Service</i>).
POTS-C:	Interfase entre la PSTN y el filtro POTS en la parte final de la red.
POTS-R:	Interfase entre los teléfonos y el filtro POTS en el lado del cliente.
PDN:	Red de Distribución de Premisas (<i>Premises Distribution Network</i>). Sistema para interconectar ATU-R con los módulos de servicio. Puede ser interconexión punto a punto o multipunto; para este último caso, la topología puede ser bus o estrella.
PSTN:	Red de Telefonía Pública Conmutada (<i>Public Switched Telephone Network</i>).

Tabla 2.2 Definiciones del modelo de referencia para un sistema ADSL (continuación).

SM:	Módulo de servicio (<i>Service Module</i>). Realiza funciones de adaptación de terminales. Algunos ejemplos son las interfaces de PC, ruteadores LAN o <i>Set Top Boxes</i> .
Splitter:	Filtro que separa las señales de alta frecuencia de ADSL de las señales de baja frecuencia de POTS, localizado tanto en la parte de la oficina central como en la parte del cliente. El filtro puede estar integrado dentro de los ATU o físicamente separado de ellos.
T-SM:	Interfase entre ATU-R y PDN, y puede estar integrada dentro de un módulo de servicio. Ejemplos son conexiones T1/E1 y conexión Ethernet.
T:	Interfase entre la PDN y los módulos de servicio. Esta interfase puede desaparecer a nivel físico cuando un ATU-R está integrado a un módulo de servicio.
U-C:	Interfase entre el lazo y el filtro POTS en el lado de la red.
U-C2:	Interfase entre el filtro POTS y ATU-C.
U-R:	Interfase entre el lazo y el filtro POTS en el lado del cliente
U-R2:	Interfase entre POTS y ATU-R
VA:	Interfase lógica entre ATU-C y el nodo de acceso. Esta interfase puede contener STM (<i>Synchronous Transfer Mode</i>), ATM (<i>Asynchronous Transfer Mode</i>), o ambos modos de transferencia.
VC:	Interfase entre el nodo de acceso y la red. Para el segmento de banda ancha de esta interfase pueden utilizarse conmutación STM, conmutación ATM o conexiones de línea tipo privada.

El modelo de referencia puede parecer complejo ya que incluye las múltiples posibilidades y capacidades de la tecnología ADSL, así como las interfaces necesarias para proveer tales capacidades. Sin embargo, este modelo podemos simplificarlo tal y como lo muestra la Figura 2.4, considerando únicamente los elementos básicos de la arquitectura. Entre estos elementos están los módems ADSL en ambos lados del lazo (ATU-R y ATU-C) y el separador o filtro (*splitter*). El lazo de cobre o abonado entre el usuario y la oficina

central termina en un filtro que separa el tráfico ADSL del tráfico de telefonía tradicional (POTS). En el lado del usuario, este filtro separa el lazo de cobre en dos pares, uno para conectar el aparato telefónico y el segundo para conectar un módem ADSL (ATU-R). En el lado de la oficina central ocurre lo mismo, solo que el proceso es un poco más complejo. El filtro manda un par a un conmutador de servicio telefónico y manda el segundo par al módem ADSL (ATU-C). En la oficina central varios ATU-C pueden incluirse en una sola caja que se conoce como DSLAM (Figura 2.5). Este dispositivo también puede ubicarse en un sitio remoto cercano a varios usuarios. Además de funciones administrativas, la función primaria de un DSLAM es multiplexar y demultiplexar los varios ATU-C incluidos hacia alguna red de transporte, típicamente una red ATM.

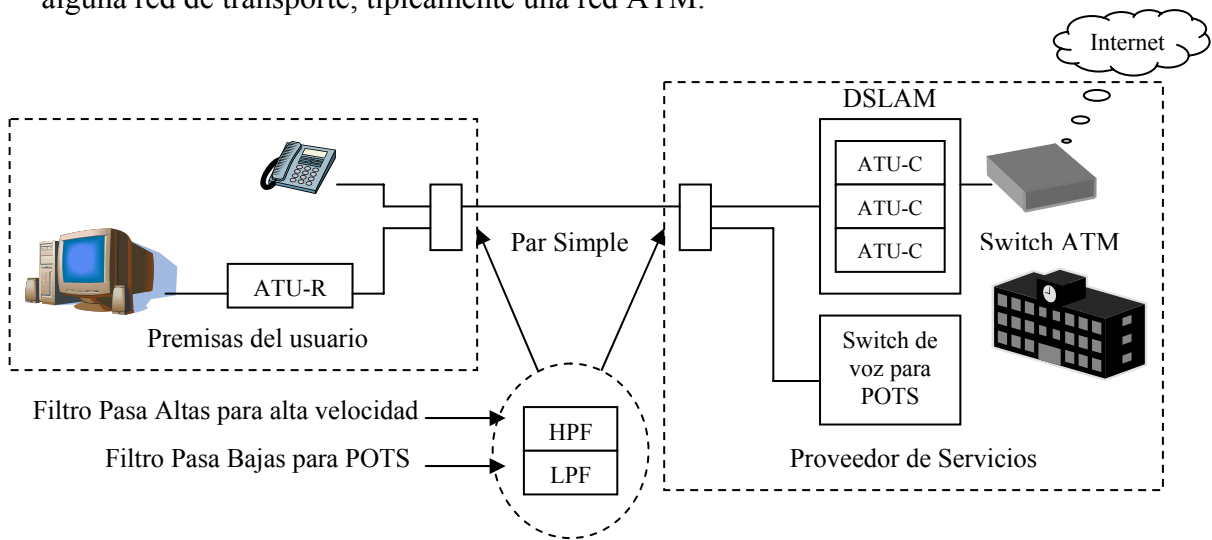


Figura 2.4 Modelo de Referencia simplificado [CAR02].

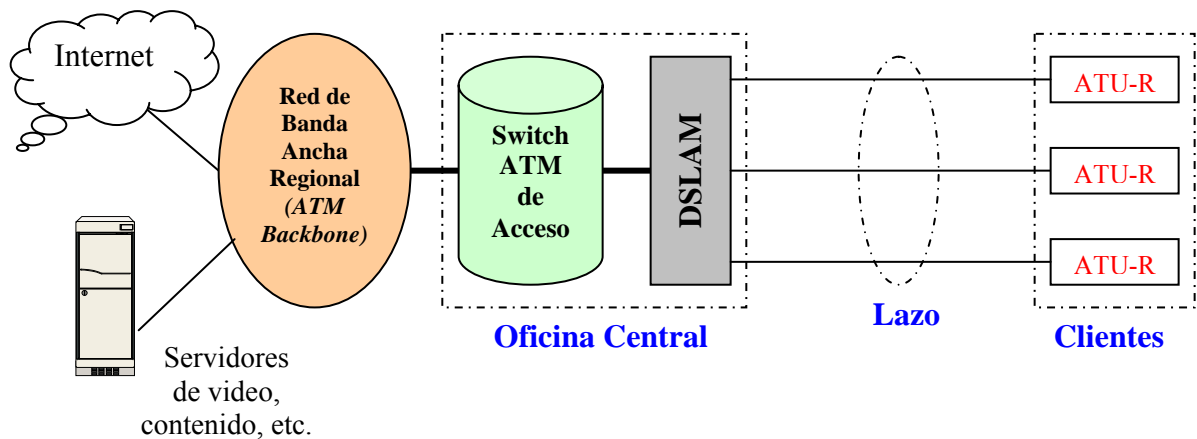


Figura 2.5 Esquema conceptual de un DSLAM [CAR02].

De acuerdo con el modelo OSI (*Open Systems Interconnection*) de referencia, ADSL es una tecnología de capa física por lo que existen capas superiores que trabajan sobre ADSL. En la mayoría de los casos, la capa de enlace de datos se implementa utilizando ATM debido a que es una tecnología de banda ancha, que se caracteriza por su eficiencia en la transmisión de datos sobre redes de alta velocidad.

Una de las ventajas de ADSL con respecto a las tecnologías de acceso basadas en *dial-up* es la característica de conexión permanente a Internet (“*always on*”). Cuando un usuario final enciende el ATU-R o módem ADSL éste se sincroniza automáticamente con el ATU-C. Aquí las células ATM que residen en la capa de enlace contienen información de direccionamiento que especifica a que proveedor de servicios de Internet debe conectarse. Cuando la conexión se establece, una conexión virtual permanente (PVC, *Permanent Virtual Connection*) también se establece entre el ATU-R y el proveedor de servicios de Internet. Como resultado, el usuario final tiene un enlace directo a Internet durante el tiempo que éste permanece encendido [TTC98].

ADSL utiliza una técnica de modulación de multiportadora, conocida como DMT (*Discrete Multi Tone*), que divide el ancho de banda disponible de 1.104 MHz en 256 subcanales, sub-portadoras o tonos que van desde 0 Hz hasta 1.104 MHz. Cada tono ocupa 4.3125 KHz del ancho de banda total y utiliza una técnica de modulación en cuadratura conocida como QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*). Lo anterior se debe a que cada tono puede transportar hasta un máximo de 15 bits de información, dependiendo de la relación señal a ruido presente en cada tono y es necesario aplicar esta técnica de modulación para codificarlos.

El primer tono o sub-canal se utiliza para los servicios de telefonía de voz tradicional (POTS), en tanto que los tonos entre en el rango de frecuencias de 4.3125 KHz a 25.875 KHz (tonos del 2 al 6) se utilizan para evitar la interferencia entre POTS y ADSL. Los tonos del 7 al 32 ubicados entre 25.768 KHz y 138 KHz se utilizan para la transferencia de datos en la dirección de subida (*upstream*), mientras que los tonos del 33 al 256 ubicados entre 138 KHz y 1.104 MHz son utilizados para la transferencia de datos en

la dirección de bajada (*downstream*). Estas frecuencias están estandarizadas por la ANSI (*American National Standards Institute*) bajo ANSI T1.413. La Figura 2.6 muestra un esquema de FDM (*Frequency Division Multiplexing*) para el ancho de banda disponible en un cable par trenzado y que hace posible la coexistencia entre POTS (*Plain Old Telephone Service*) o PSTN, ISDN y la tecnología ADSL. La Figura 2.7 muestra la asignación de tonos de frecuencia o sub-canales para la modulación DMT.

Existe otra técnica para asignar las bandas de frecuencias, conocida como cancelación de eco. Esta técnica permite un traslape del canal de bajada sobre el canal de subida, lo que causa que los canales sean independientes permitiendo un incremento en la tasa de transmisión de bajada. A pesar de lo anterior, ésta técnica no es muy utilizada ya que a costa de un incremento en la tasa de transmisión de bajada se reduce la tasa de transmisión de subida, además de que resulta mucho más complejo de implementar. Por estas y otras razones concernientes a la administración del espectro se prefiere utilizar FDM [CAR02, BIN00].

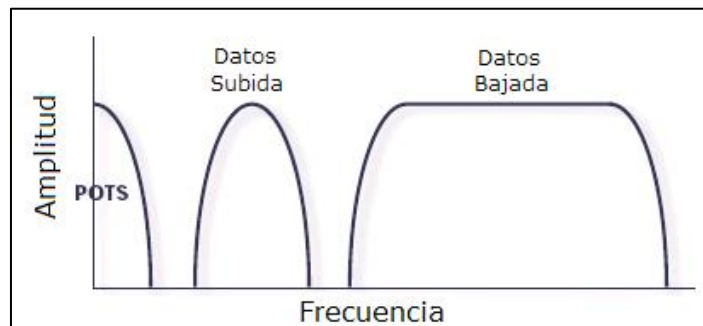


Figura 2.6 FDM para un cable par trenzado [TTC98].

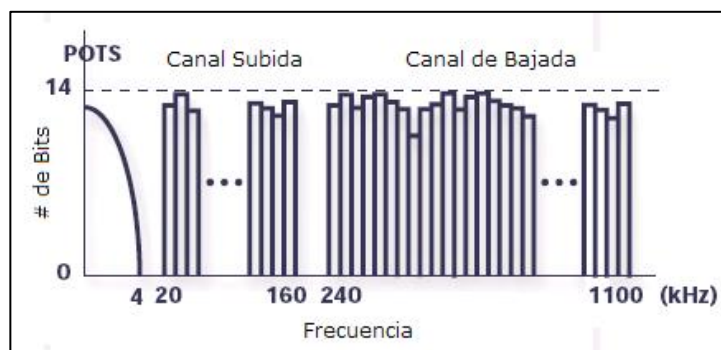


Figura 2.7 Asignación de sub-canales o tonos para modulación DMT [TTC98].

2.2 ADSL TRANSCEIVER

En esta sección se explican cada uno de los bloques de un ADSL *transceiver* o módem ADSL, así como los conceptos más importantes que se utilizan tales como modulación DMT, modulación QAM, ecualización en el dominio del tiempo y de la frecuencia, interferencia entre símbolos, etc. Se explican por separado el transmisor y el receptor, inconvenientes del canal de transmisión y la modulación DMT.

2.2.1 Arquitectura típica

La arquitectura típica de un ADSL *transceiver* (Ver Figura 1.2, Capítulo 1, sección 1.2) está basada en tecnología avanzada de Procesamiento Digital de Señales. Sus bloques funcionales están bien definidos tanto en el transmisor como en el receptor y realizan funciones tales como conversión serial a paralelo, paralelo a serial, conversión digital-análoga, análoga-digital, modulación y demodulación QAM, generación y eliminación de espejo de datos (*mirror data*), transformada rápida de Fourier (FFT), transformada rápida inversa de Fourier (IFFT), adición y substracción de prefijos cíclicos (*cyclic prefix*), y ecualización en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia.

2.2.2 Modulación Multitono Discreta (DMT)

La modulación Multitono Discreta es una forma común de modulación multiportadora que fue introducida en 1980 por la IBM para hacer uso de los avances significativos en procesadores digitales de señales y algoritmos FFT. Ha sido ampliamente utilizada en los módems de voz tradicionales y actualmente los estándares ANSI T1.413 e ITU G.992.1 la han adoptado para los módems ADSL [CIO91].

La elección de esta técnica de modulación como estándar para ADSL se debe fundamentalmente a que en el ambiente de transmisión de ADSL se necesitan técnicas de modulación y ecualización muy eficientes para garantizar un buen desempeño, debido a la presencia de muchos factores negativos tales como la atenuación en el canal, interferencia

entre símbolos, *crosstalk*, ruido gaussiano blanco aditivo (AWGN) y ruido impulsivo [CCB94].

El objetivo fundamental de la modulación DMT es dividir el ancho de banda del canal de transmisión en un conjunto de sub-canales ortogonales cada uno con su propia sub-portadora. Los datos se transmiten a través de cada sub-canal de manera independiente a los otros sub-canales y al mismo tiempo. Cada sub-canal puede transmitir un número diferente de bits mismos que pueden asignarse convenientemente a los diferentes sub-canales. Existen muchos algoritmos para la asignación del número de bits por cada sub-canal, pero la mayoría coincide en asignar el mayor número de bits a aquellos sub-canales como mayor relación señal a ruido (SNR), mientras que el menor número de bits se asignan a los sub-canales con menor SNR [CCB94].

Como se describe en la sección 2.1 (página 14), el estándar ANSI T1.413 para ADSL divide el ancho de banda del canal de transmisión, en este caso, el ancho de banda de 1.104 MHz de la línea telefónica en 256 sub-portadoras o sub-canales donde los tonos del 7 al 256 se utilizan para la transmisión de datos. La siguiente tabla muestra las frecuencias asignadas para ambas direcciones de transmisión.

Tabla 2.3 Asignación de frecuencias para modulación DMT

Dato	Dirección Subida	Dirección Bajada
Tonos	7 - 32	33 - 256
Rango de frecuencias	25.875 KHz – 138 KHz	138 KHz – 1.104 MHz
Ancho de banda por cada sub-canal	4.3125 KHz	4.3125 KHz

En ADSL el número de bits que puede transportar cada sub-canal varía entre 0 y 15 bits, cuya asignación se realiza en forma de tablas de asignación de bits cuando ésta se intercambia entre el transmisor y receptor durante el periodo de inicialización y prueba. Durante este proceso, el transmisor adquiere una estimación de la respuesta al impulso del canal y del espectro de ruido *crosstalk* antes de que la transmisión comience. Con esta

estimación, el receptor también calcula el SNR del canal necesario para determinar el número de bits que ese canal puede transportar y lo devuelve al transmisor. Este proceso entre transmisor y receptor se resume de la siguiente manera [ERW02a]:

1. Definen un modo común de operación y reloj, así como un símbolo de sincronización.
2. Identifican el canal.
3. Calculan la asignación óptima de bits y energía para cada sub-canal.
4. Intercambian las tablas de asignación de bits y energía.

El número total de bits que pueden transmitirse a través del canal se determina con la siguiente ecuación:

$$b_{total} = \sum_{i=n1}^{n2} b_i \quad (2.1)$$

donde b_i es el número de bits en el i -enésimo sub-canal. Para el canal de subida $n1$ es igual a 7 y $n2$ igual a 33. Para el caso del canal de bajada $n1$ es igual a 33 y $n2$ igual a 256. Con la ecuación (2.1) podemos determinar la capacidad del canal según las fórmulas de Shannon:

$$C = \sum_{n1}^{n2} \Delta f \cdot b_i = 4.3125 \cdot b_{total} \quad (2.2)$$

donde Δf es el ancho de banda de cada sub-canal, que para el caso de ADSL es igual a 4.3125 KHz.

Una vez que el *transceiver* se ha inicializado, cada sub-canal o sub-portadora conteniendo los bits determinados por la tabla de asignación se modula utilizando la técnica de modulación digital QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) o Modulación de Amplitud en Cuadratura. Con este esquema de modulación, cada sub-canal puede transmitir a una tasa de transmisión que varía entre 0 y 60 kbps. La suma de las tasas de transmisión

de todos los sub-canales es igual a la tasa total de transmisión de datos del sistema. En teoría, con cada sub-canal llevando información a 60 Kbps sería posible transmitir a una tasa de transmisión de 15.36 Mbps. En la práctica esto no es posible debido a muchos factores negativos del canal de transmisión y la implementación del sistema [STA04].

2.2.3 Modulación de Amplitud en Cuadratura (QAM)

La modulación QAM es una modulación digital en la que el mensaje está contenido tanto en la amplitud como en la fase de la señal transmitida. Se basa en la transmisión de dos mensajes independientes por un mismo y único camino. Esto se consigue modulando la misma portadora, desfasada entre uno y otro mensaje. Esto supone la formación de dos canales ortogonales en el mismo ancho de banda, con lo cual se mejora en eficiencia del ancho de banda [STA04].

En el transmisor, el modulador QAM mapea una serie de bits de entrada a un punto (x,y) del mapa de constelaciones. Estas variables x y y especifican la amplitud de las ondas coseno y seno respectivamente, que serán enviadas por el canal. Por lo tanto, la expresión de la onda enviada es $V(t) = X \cos(\omega t) + Y \sin(\omega t)$. En el receptor, el demodulador QAM trata de recuperar la amplitud de cada componente [WAN02].

El tamaño de cada constelación QAM depende del número de bits que cada sub-portadora transporta, es decir, b bits resulta en una constelación con 2^b puntos. Por ejemplo, una constelación QAM de 4 puntos corresponde a 2 bits (00, 01, 10,11), una constelación QAM de 16 puntos corresponde a 4 bits y así sucesivamente. El tamaño de constelación máxima en ADSL es 32,768, la cual corresponde a 15 bits [JOH98].

La Figura 2.8 muestra algunos ejemplos de constelaciones QAM estandarizadas por la ANSI. Las etiquetas de los puntos de la constelación son la representación en números decimales de los bits que serán mapeados y transmitidos. Los símbolos resultantes de este mapeo son números complejos que pueden representarse como $C_k = a_k + jb_k$ donde a es a componente en fase y b es la componente en cuadratura.

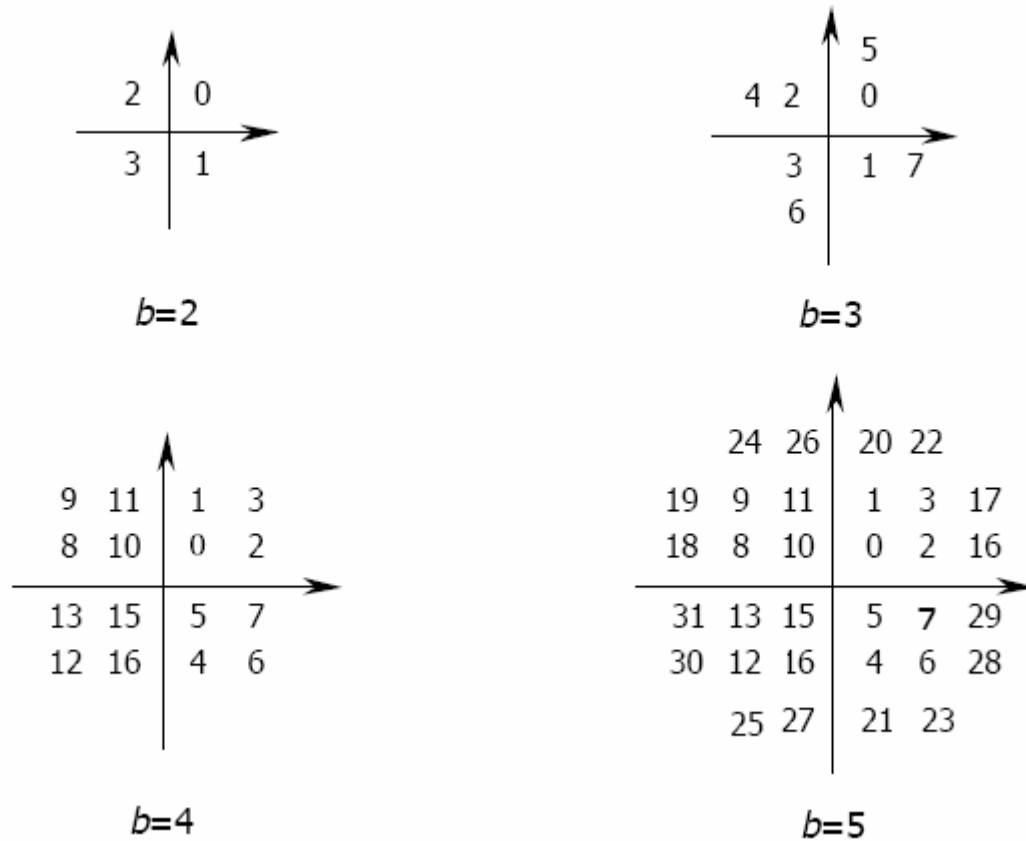


Figura 2.8 Ejemplos de constelaciones QAM [WAN02].

En la Figura 2.9 [ERW02b] se muestra un modelo de la modulación DMT en un módem ADSL que utiliza 256 sub-portadoras. Esta figura es de gran utilidad para explicar este tipo de modulación y los bloques que intervienen en la misma. Este es un esquema alternativo al que se muestra en la Figura 1.2 del capítulo 1 [ARS99].

2.2.4 Transmisor DMT

El primer bloque del *transceiver* es un convertidor serial a paralelo cuya tarea es dividir la serie de bits que entra al transmisor en un conjunto de varias series de bits cuyo destino es el banco de codificadores QAM, donde a cada sub-canal se le asigna un número determinado de bits como se describe anteriormente. El número total de codificadores/decodificadores en el banco QAM es igual al número de sub-portadoras utilizadas por el sistema. Cada una de estas series de bits es codificada en sub-símbolos,

que contienen el número de bits (hasta 15 bits) determinado por la tabla de asignación de bits en cada sub-canal o tono. Estos sub-símbolos son números complejos que pueden verse como elementos en el dominio de la frecuencia.

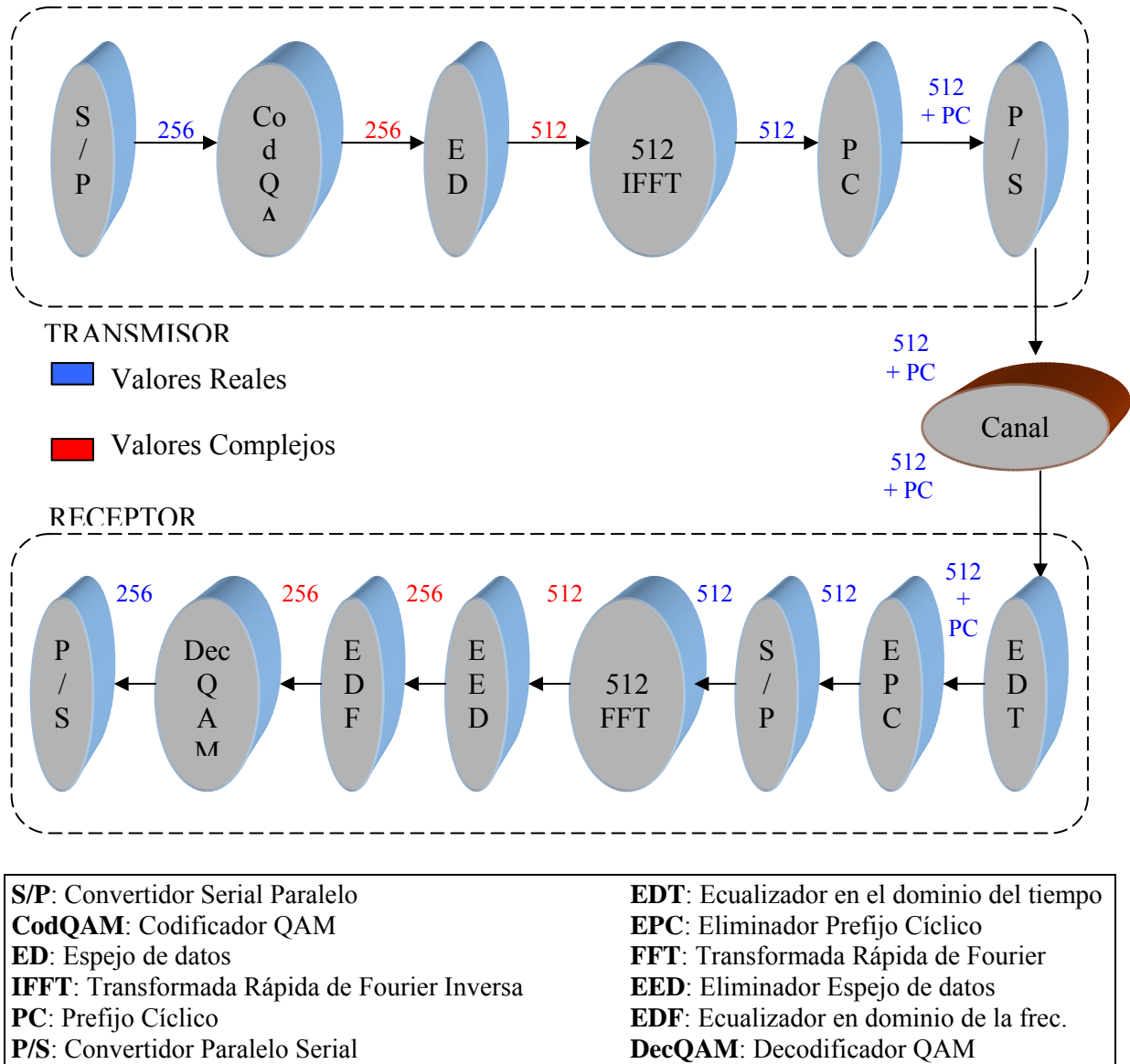


Figura 2.9 Modelo para un ADSL *transceiver* que utiliza 256 sub-canales [ERW02b].

La siguiente etapa realiza una imagen de las salidas del banco QAM con los complejos conjugados de los sub-símbolos, lo que se conoce como espejo de datos, con el objeto de implementar un bloque que realice una IFFT de 2N puntos, donde N es el número de sub-canales. Este bloque IFFT se implementa con el fin de realizar la modulación DMT,

ya que ésta última puede ser implementada utilizando la transformada discreta inversa de Fourier (IDFT) que a su vez puede implementarse mediante la IFFT. Para el caso del canal de bajada de ADSL, $N=256$. Debido a este procesamiento, a las salidas del bloque IFFT tendremos $2N$ muestras con valores reales en el dominio del tiempo. Este bloque de $2N$ sub-símbolos forma lo que se conoce como símbolo DMT.

El bloque de adición de un prefijo cíclico se utiliza para introducir una banda de separación en el dominio del tiempo entre los símbolos DMT, para evitar la interferencia entre símbolos. Otra de las ideas de este bloque es que hace más fácil el proceso de ecualización, además de que hace posible la eliminación de la mayor parte de las componentes de la interferencia entre símbolos. Este bloque es útil para formar la trama o *frame* que se transmitirá, sin embargo, la adición de este prefijo disminuye la eficiencia de potencia y la velocidad de transmisión del *transceiver*. Este prefijo se forma con las últimas v muestras (típicamente 32 muestras) de las $2N$ muestras que forman un símbolo DMT, por lo tanto, un bloque consiste de $2N+v$ muestras. La Figura 2.10 muestra el mecanismo para insertar el prefijo cíclico a cada uno de los símbolos DMT que se pretenden transmitir en una trama [ARS00].

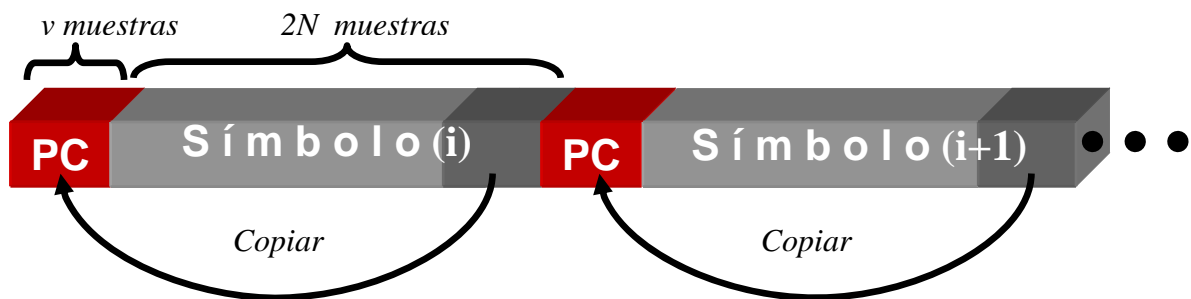


Figura 2.10 Mecanismo para adición del prefijo cíclico a los símbolos DMT [ARS99].

Posteriormente a la adición de este prefijo, se realiza una conversión paralelo-serial para formar precisamente la trama o *frame* que se transmitirá. Esta trama llega a un convertidor digital análogo que transforma las señales digitales a señales eléctricas analógicas que pueden transmitirse a través del canal.

2.2.5 Canal de transmisión

El canal de transmisión es el lazo de abonado, conocido simplemente como línea telefónica entre el usuario y la oficina central. Este canal de cobre presenta algunos inconvenientes que afectan el proceso de transmisión y recepción de la información y desde luego el desempeño de la tecnología ADSL. Estos inconvenientes pueden clasificarse en dos grandes grupos: intrínsecos y extrínsecos al medio de transmisión [CKB99].

Ejemplos de inconvenientes intrínsecos son el ruido termal, ecos y reflexiones, atenuación y *crosstalk*. Existen algunos otros componentes que residen en la infraestructura de la red telefónica que pueden perjudicar la operación del sistema ADSL, tales como lazos abiertos o puentes (*bridged taps*), inductancias parásitas, filtros para mitigar la interferencia de radio frecuencia, uniones de alta resistencia, etc. [CKB99].

Ejemplos de inconvenientes extrínsecos son ruido impulsivo proveniente de lámparas, aparatos eléctricos, líneas de potencia, maquinaria, conmutadores, luz fluorescente, etc. Otro tipo de ruido muy común que se acopla electromagnéticamente a la línea telefónica es el generado por propagación de RF. Las transmisoras de AM son las principales fuentes [CKB99].

Las fuentes de ruido mencionadas anteriormente pueden clasificarse alternativamente como limitantes en capacidad o limitantes en desempeño. El ruido limitante en capacidad usualmente varía de forma lenta, este es el caso del ruido termal y el *crosstalk*. Estos niveles de ruido usualmente son previsibles y relativamente fáciles de combatir cuando las compañías telefónicas crean una buena planificación y ejecutan una mejor implementación. Los ruidos limitantes en desempeño, tales como el ruido impulsivo y la interferencia de RF, son intermitentes en la naturaleza. Son geográficamente variables e impredecibles y por lo tanto, son más complicados de combatir. Es por esto que las compañías utilizan márgenes de seguridad en los procesos de planeación e implementación de la redes. En el caso de las tecnologías DSL, éstas utilizan técnicas de procesamiento de

señales adicionales tales como corrección de errores para mitigar estas fuentes de ruido [CKB99].

El ruido impulsivo es un tipo de señal temporal que puede ser de banda angosta o banda ancha y que se presenta aleatoriamente. Este puede ser generado por una gran variedad de dispositivos electrónicos y electromecánicos. La amplitud de los impulsos puede ser de apenas unos cuantos milivolts y puede durar hasta cientos de microsegundos [COW99].

El ruido conocido como *crosstalk* es el problema que contribuye mayormente a la limitación de capacidad del sistema ADSL. Éste es causado por la radiación electromagnética de otras líneas telefónicas próximas, o dentro del mismo cable. Este ruido se incrementa con la frecuencia y puede ser generado por señales viajando en dirección opuesta, a lo que se le llama NEXT (*Near-End-Crosstalk*) y por señales viajando en la misma dirección, lo que se conoce como FEXT (*Far-End-Crosstalk*). La Figura 2.11 muestra estos conceptos. [COW99].

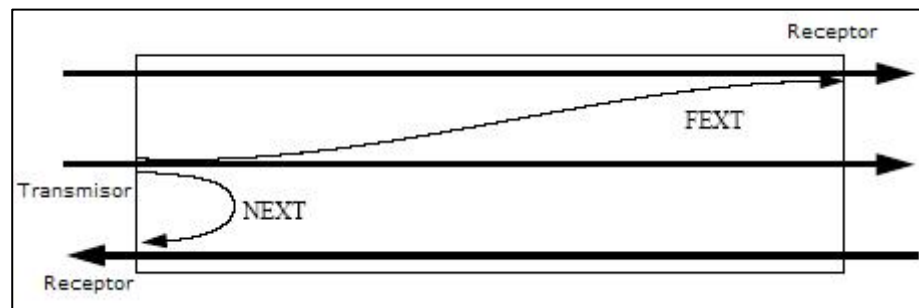


Figura 2.11 Concepto de *crosstalk* en las líneas telefónicas [BAC01].

2.2.6 Receptor DMT

En el receptor, primero se realiza la conversión analógica-digital para realizar el procesamiento digital de la información que llega. Se implementa un ecualizador en el dominio del tiempo cuya tarea es reducir la interferencia entre símbolos (ISI) y eliminar el

ruido adquirido en el canal. Otro tipo de ecualizador en el dominio de la frecuencia se aplica para compensar la distorsión en fase y en magnitud. Las funciones del receptor son inversas a aquéllas que ejecuta el transmisor, por lo tanto, el procesamiento es inverso al descrito anteriormente para el transmisor [ERW02a].

En el receptor DMT, el ecualizador en el dominio del tiempo (TEQ- *Time-domain Equalizer*) es fundamental para el desempeño del *transceiver* ADSL. Este ecualizador reduce la interferencia entre símbolos mediante la reducción de la duración efectiva de la respuesta al impulso del canal. La Figura 2.12 muestra un ejemplo de la respuesta al impulso del canal, causada por las imperfecciones del canal que se describieron en la sección anterior.

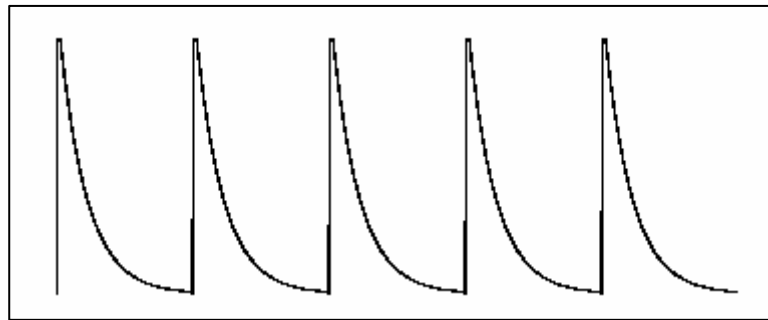


Figura 2.12 Ejemplo de respuesta al impulso del canal [BAC01].

La interferencia entre símbolos es uno de los mayores problemas en los sistemas de comunicaciones, que aparece entre dos símbolos cuando estos no son iguales. En este caso el primer símbolo terminará en un lugar que no es el inicio del segundo, lo que significa que existe un salto entre los dos símbolos que causa interferencia. La Figura 2.13 se explica gráficamente este fenómeno. La respuesta del canal mostrado en la Figura 2.12 es el tipo de condiciones que causan este fenómeno de interferencia entre símbolos. El objetivo del ecualizador en el dominio del tiempo (TEQ) es mover el problema de un intervalo muy largo a uno muy corto, es decir, al intervalo del prefijo cíclico. Después del ecualizador casi todo el problema se transporta a las primeras muestras del símbolo DMT, donde el prefijo cíclico contiene información redundante [BAC01].

Como se mencionó anteriormente, una de las formas para prevenir la interferencia entre símbolos es utilizando un prefijo cíclico de 32 muestras de longitud (de las 512 muestras). La longitud de este prefijo debe ser tan grande como la duración de la respuesta al impulso del canal. Sin embargo, si la respuesta al impulso del canal es relativamente más larga que la longitud de un símbolo DMT (512 muestras forman un símbolo DMT), el desempeño del sistema se ve muy seriamente afectado. Para corregir esta situación, se utiliza el ecualizador en el dominio del tiempo para asegurar que la respuesta al impulso del canal sea de la misma longitud que el prefijo cíclico de cada símbolo DMT. La Figura 2.14 muestra la respuesta del canal después de aplicarse la ecualización.

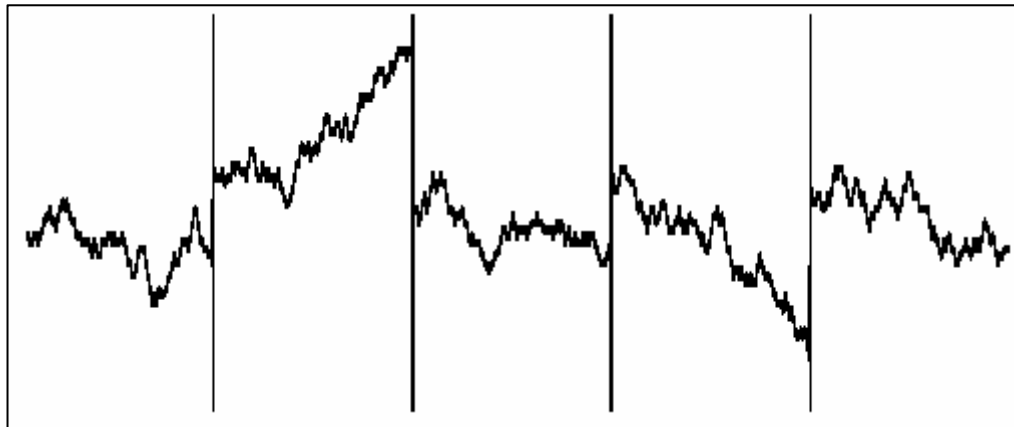


Figura 2.13 Ejemplo de diferentes símbolos transmitidos con ISI [BAC01].

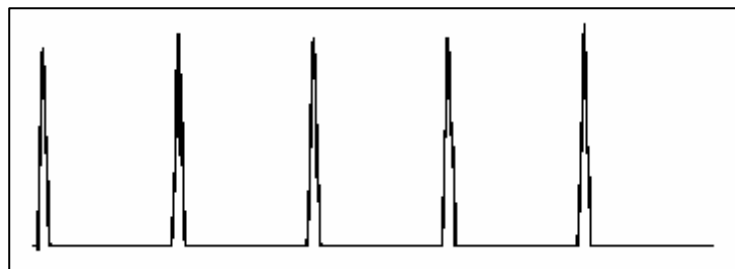


Figura 2.14 Respuesta del canal después del ecualizador [BAC01].

Una vez que se realiza la ecualización y se elimina la interferencia entre símbolos, el sistema elimina el prefijo cíclico y aplica una conversión serial paralelo para que las muestras en el dominio del tiempo pasen al dominio de la frecuencia mediante la Transformada Rápida de Fourier (FFT). Posteriormente se eliminan los complejos

conjugados, es decir, el espejo de datos, con lo que ahora tenemos los 256 sub-símbolos en un principio generados por el banco de codificadores QAM del transmisor. A continuación estos sub-símbolos entran a un ecualizador en el dominio de la frecuencia (FEQ) para compensar la distorsión en magnitud y fase causada por el canal y el ecualizador en el dominio del tiempo. La Figura 2.15 muestra el efecto que tiene la ecualización en el dominio de la frecuencia sobre los puntos de una constelación QAM. Como se puede apreciar, la fase y la magnitud son compensadas logrando que los puntos QAM de la constelación tengan distancias aproximadamente equidistantes unos con otros. El grupo de puntos concentrados en el centro corresponde a los sub-símbolos antes de la ecualización, mientras que la distribución descentralizada corresponde al estado de los sub-símbolos después de la ecualización.

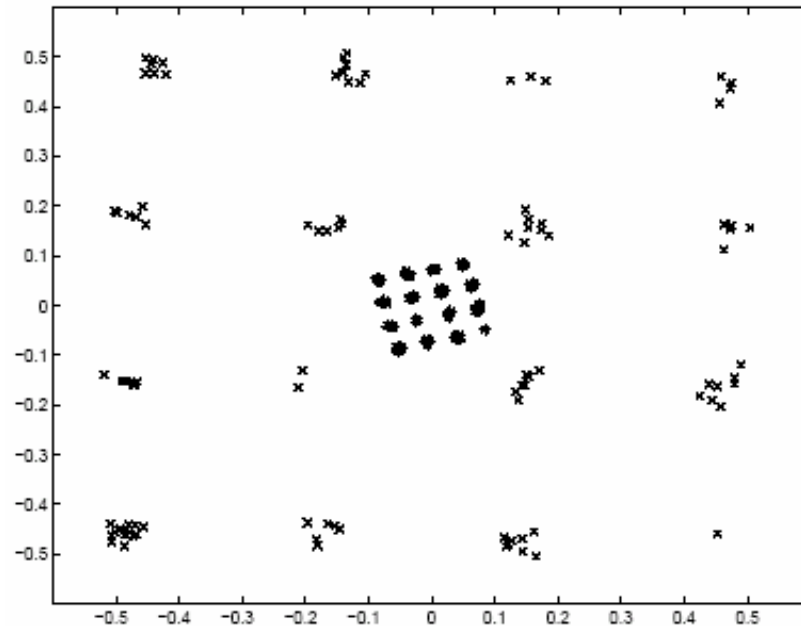


Figura 2.15 Puntos de la constelación QAM antes y después de la ecualización FEQ [BAC01].

Finalmente, un banco de decodificadores QAM transforma los símbolos complejos en series de bits que llegan a un convertidor paralelo serial que forma la secuencia de bits inicial.