

Redes de computadores: Apuntes oficiales

Introducción y objetivos

Las redes de computadores son actualmente un elemento clave en la actual sociedad de la información. Estas redes permiten principalmente compartir información y recursos entre usuarios que se encuentran en cualquier lugar del planeta. La creación de estas redes ha sido posible gracias a la evolución de las técnicas de transmisión y de las arquitecturas de comunicaciones sobre las que se fundamentan las mismas.

A lo largo de este tema el alumno adquirirá una serie de conceptos fundamentales en lo referente a las redes de comunicaciones que le servirán a lo largo de todo el curso. Concretamente, el alumno aprenderá qué es una red y qué arquitecturas de comunicaciones existen para estructurarla. Conocerá también diferentes conceptos básicos de la transmisión de datos, como son el ancho de banda o la velocidad de señalización. Por último, el alumno se familiarizará con las diversas técnicas de transmisión de datos y conmutación que existen para lograr una comunicación efectiva entre sistemas remotos. Esto incluye conocimientos acerca de la distribución del ancho de banda.

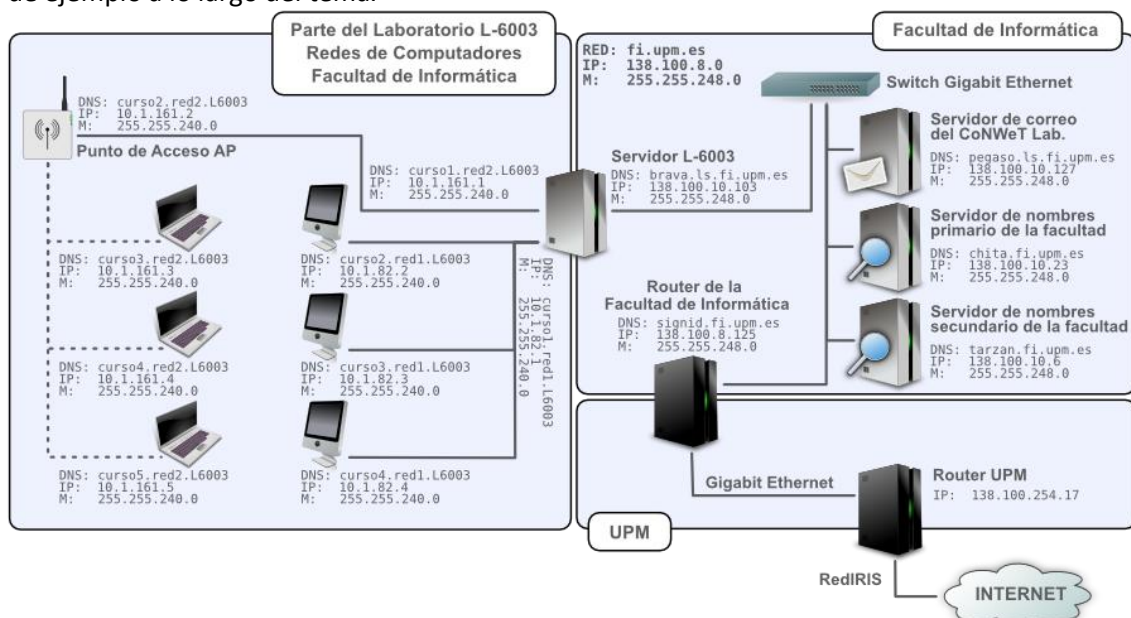
Tema 1 - Introducción a las Redes de Computadores y a las Arquitecturas de Comunicaciones

Introducción a las comunicaciones

Concepto de Red

Las redes son actualmente una de las partes esenciales de los sistemas de información, ya que a través de ellas, un usuario puede comunicarse con otros y compartir recursos de información y computación, con el consiguiente ahorro económico que esto conlleva. Por tanto, las redes constituyen un poderoso medio de comunicación y de compartición de recursos (desde un servidor de almacenamiento a una costosa impresora láser a color de última generación).

A continuación se muestra un diagrama de la red de la facultad de informática, la cual servirá de ejemplo a lo largo del tema.



La red descrita en la imagen anterior permite que seis ordenadores de un laboratorio de la facultad se puedan comunicar entre ellos, con la Facultad y con todo Internet, a través de diferentes tecnologías (Ethernet y WiFi). En esta red se encuentran ordenadores personales, servidores, puntos de acceso, switches y routers, que se denominan de forma genérica **sistemas**.

Un **sistema** es un elemento **direccionable** dentro de una red, es decir, un elemento con una dirección individual y única en dicha red, que le identifica y que permite diferenciarlo del resto de sistemas.

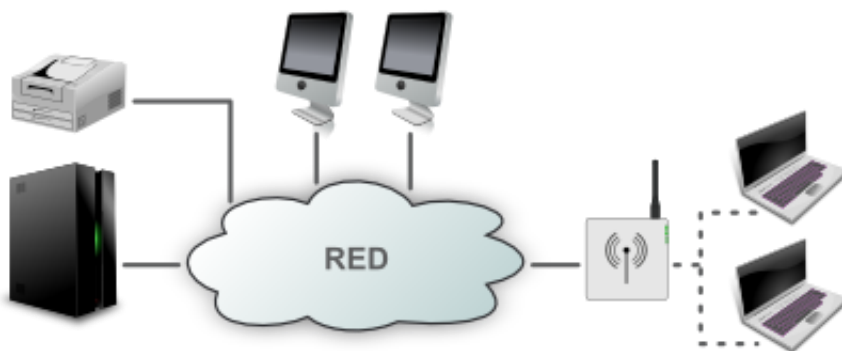
Los sistemas de la red se comunican y comparten información. En la comunicación entre sistemas se pueden distinguir dos tipos de sistemas: los sistemas finales, que son aquellos situados en los extremos de una comunicación; y los **sistemas intermedios**, que son aquellos que hacen de intermediarios entre dos sistemas finales y se encargan de dirigir o encaminar las unidades de datos en función de la dirección del sistema destinatario de dichos datos.

De la misma forma que dos personas que quieren comunicarse han de utilizar un mismo idioma, para que dos sistemas puedan compartir información han de hacer uso de un conjunto de reglas que rijan dicha comunicación. Este conjunto de reglas se recogen en una serie de protocolos de comunicaciones.

Protocolo de comunicaciones es el conjunto de reglas que rigen el diálogo entre entidades que realizan las mismas funciones.

En la comunicación entre varios sistemas se suelen emplear varios protocolos. Los sistemas cuentan con unos elementos especializados llamados entidad, que son los encargados de manejar los diferentes protocolos. Una entidad utiliza un protocolo concreto para comunicarse con la entidad equivalente del sistema remoto. Además, las entidades de un mismo sistema también colaboran entre sí apoyándose en las interfaces de comunicación de las otras entidades.

Una **interfaz de comunicación** es el medio de conexión funcional entre dos entidades independientes dentro de un mismo sistema, mediante la cual se pueden enviar y recibir los diferentes tipos de datos. Más formalmente, se puede definir **interfaz** como el conjunto de reglas que rigen el dialogo entre entidades, dentro de un mismo sistema, con funciones diferentes.



Una vez se ha definido qué son los sistemas y cómo se comunican entre sí, se va a pasar a describir cómo es la red que los une. La red de computadores mostrada en la figura anterior es, por ahora, difícil de entender. Sin embargo,

el objetivo de la asignatura es que al final de la misma el alumno comprenda todo aquello que afecta a dicha red. Por ahora es suficiente con considerar que una red es algo muy conceptual, que se va a representar gráficamente mediante una “nube”, y que sirve como medio común de comunicación y compartición de recursos de todo tipo.

Una **red** es un conjunto de sistemas, tanto finales como intermedios, que permite el intercambio de información entre los mismos.

Una red de ordenadores va a estar formada por sistemas (ordenadores en este caso) dotados de un adaptador de red (elemento hardware generalmente instalado en la placa base del equipo), el cual permite conectar dicho sistema a un medio físico compartido entre todos los sistemas de la red. La red de ordenadores más simple que se puede concebir es la formada por dos ordenadores unidos a través de un cable especial llamado cable cruzado, que es el medio físico compartido en este caso.



Sin embargo, por lo general las redes son más complejas, y están compuestas por múltiples sistemas (ordenadores, impresoras, etc.), ya sea compartiendo un mismo medio físico o a través de sistemas intermedios (como switches o puntos de acceso) que actúan como elementos de interconexión entre los sistemas finales.



Las redes pueden considerarse desde dos puntos de vista diferentes: físico y abstracto. Cada punto de vista da lugar a diferentes concepciones de red:

- **Redes de Datos (o redes físicas):** Estas redes engloban a aquellas que proporcionen cualquier tipo de servicio de comunicaciones (voz, datos, vídeo, etc.). Por ejemplo, una red de cable Ethernet o una red inalámbrica WiFi.
- **Redes de Ordenadores/Computadoras (o redes abstractas):** Están formadas por la interconexión de redes de datos.

La interconexión de dos o más redes se realiza a través de un sistema intermedio al que se denomina router o dispositivo de encaminamiento. La interconexión de redes requiere que los sistemas que participan dispongan de un sistema de direccionamiento que permita tanto identificarlos como encaminar los datos. Asimismo, se necesita que los sistemas compartan el

conjunto de protocolos de comunicaciones, lo que permite la interoperabilidad entre diferentes sistemas finales.

El ejemplo más significativo de interconexión de redes es la red Internet, una inmensa red de computadoras formada por la interconexión de infinidad de redes de datos y, en donde se utiliza un formato común de direccionamiento y unos mismos protocolos de comunicaciones, denominados de forma genérica TCP/IP.

Arquitecturas estructuradas de comunicaciones

En este apartado se detalla cómo funciona la comunicación en una red de computadores. Para ello, y volviendo sobre el ejemplo inicial, se va a contemplar cómo un ordenador del laboratorio puede acceder a un equipo remoto de Internet (servidor de destino). Escribe una ruta de red en el área de texto del navegador de la siguiente imagen y **pulsa el botón "Ir"**.

Si se considera dicha comunicación de forma simplificada, la comunicación entre el ordenador del laboratorio y un equipo remoto de Internet se puede ver como una nube que interconecta ambos equipos a través de sistemas intermedios, tal y como se muestra en la siguiente figura:



Para que dos sistemas se interconecten es necesario que dialoguen utilizando un mismo conjunto de reglas. Si este conjunto de reglas se implementase a través de un único módulo software, el resultado sería un componente monolítico muy complicado de mantener, y sobre todo de adaptar a cualquier cambio en las reglas que rigen la comunicación. Por ello, en lugar de agrupar todas las reglas en un único protocolo, éstas se organizan en capas o niveles independientes entre sí.

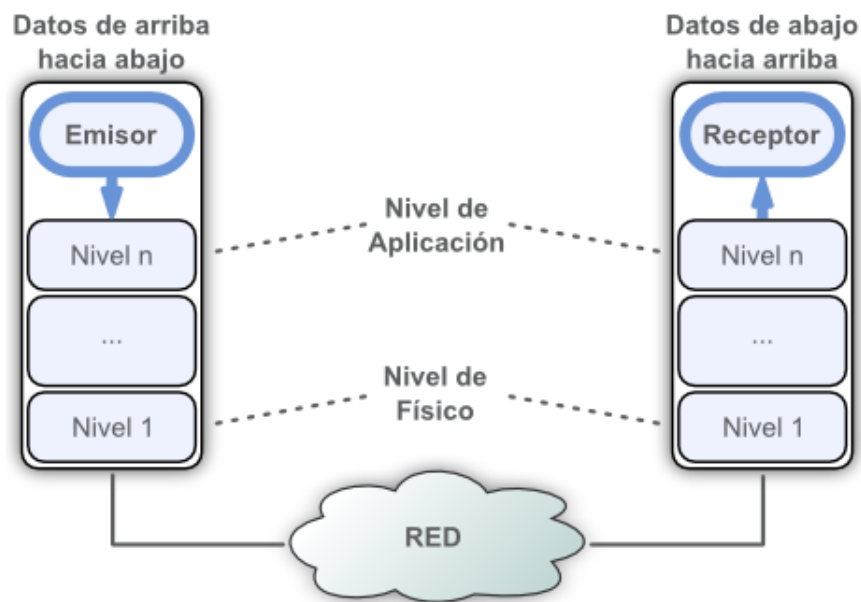
Estos niveles están organizados en forma de pila vertical, de forma que un nivel da servicio al nivel inmediatamente superior, mientras que a su vez, hace uso del nivel inferior para llevar a cabo su función. Esta estructuración en niveles presenta dos ventajas muy relevantes:

- **Reduce la complejidad**, ya que facilita la labor de diseño a través de una estructura más comprensible por una división en diferentes niveles de comunicaciones mutuamente independientes. Incluso esta característica permite que diferentes equipos de trabajo (programadores) puedan desarrollar sus labores en diferentes niveles sin interferirse.
- **Facilita el cambio tecnológico**, ya que permite que cualquier cambio llevado a cabo en cualquier nivel no afecte (si el sistema está bien estructurado) al resto de los niveles de la arquitectura.

Esta organización en una pila de niveles es lo que se conoce como **arquitectura estructurada de comunicaciones**. En una arquitectura estructurada de comunicaciones existen diferentes niveles, y en cada nivel se utilizan uno o varios protocolos. Otra ventaja de utilizar esta organización es que un nivel puede modificarse o cambiarse sin afectar a los demás. Es

importante comentar, que a excepción del nivel más elemental, conocido como nivel físico o de hardware (nivel 1), cada nivel de comunicaciones tendrá, al menos, una entidad software o proceso que se rige bajo un determinado protocolo de comunicaciones. Esto significa que las entidades de cada uno de los niveles emplean el protocolo para comunicarse con otras entidades homólogas de su mismo nivel.

La siguiente figura muestra los niveles de comunicaciones de dos sistemas finales dotados de una misma arquitectura genérica de comunicaciones. Los sistemas están conectados a través de una red, ya sea de datos o computadoras. En este ejemplo, el nivel más alto es un nivel n mientras que el más elemental se corresponde con el nivel 1.



En el ámbito de las redes de computadores, la comunicación entre los diferentes niveles

de un mismo sistema consiste en enviar los datos o la información que se ha de transmitir de ARRIBA hacia ABAJO (del subsistema del nivel "n" al subsistema del nivel 1) en el sistema emisor, y de ABAJO hacia ARRIBA (del subsistema del nivel 1 al subsistema del nivel n) en el sistema receptor. Cada entidad en el sistema emisor conoce previamente, y por configuración, a su *vecino del piso de abajo* para la entrega correcta de la información. En el sistema receptor, si existe más de una entidad en un determinado nivel de comunicaciones de la arquitectura, la entidad en el *piso* o nivel inmediatamente inferior debe conocer (examinando la información de control recibida) el identificador de la entidad del piso superior a la cual va a pasar los correspondientes datos. Sólo en el caso de que únicamente exista una entidad en un nivel superior, el vecino de abajo le pasa los datos por omisión.

Actualmente existen dos tipos de estándares en el contexto de las arquitecturas estructuradas de comunicaciones:

- **De iure:** Del latín *por razón, por justicia*, etc. Son los auténticos estándares, ya que son aprobados y propuestos por un organismo internacional de normalización. Estos estándares sirven de modelo de referencia ya que, aunque no definan los protocolos concretos a utilizar en cada nivel, sí definen las tareas que se deben realizar en cada uno de ellos. Este es el caso de la arquitectura OSI del organismo ISO.
- **De facto:** Mal llamados estándares, pero se consideran como tales debido al *facto* o al hecho de su amplia utilización. Éste es el caso de la arquitectura TCP/IP del IAB, la cual

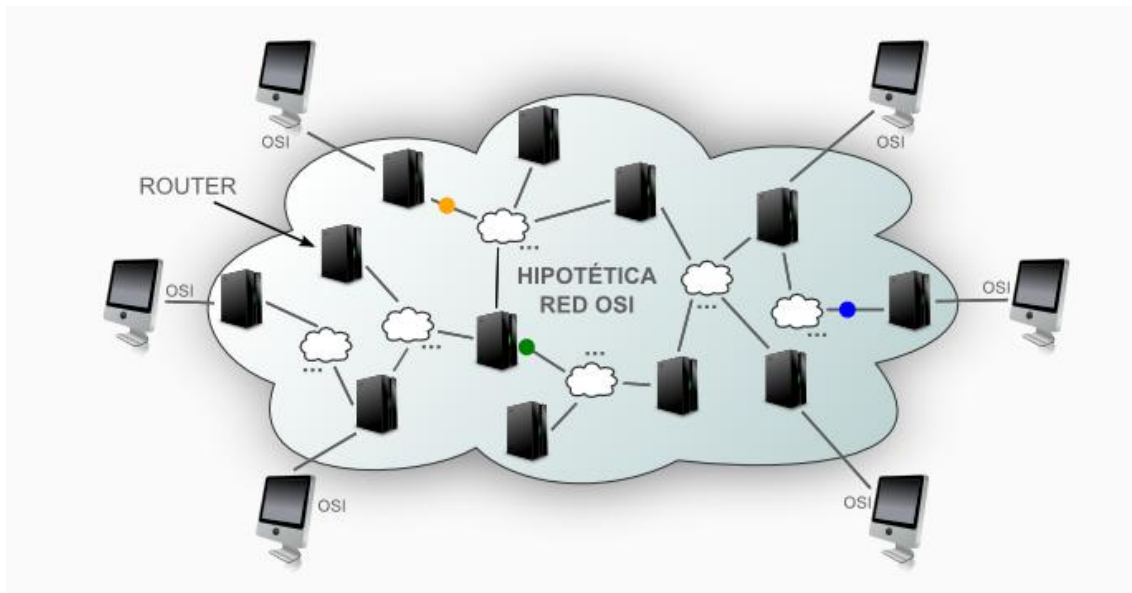
no ha sido propuesta o aprobada por ningún organismo internacional de normalización, y sin embargo, es la arquitectura de comunicaciones por excelencia.

Modelo OSI

En los inicios de las comunicaciones entre ordenadores, los sistemas se diseñaban como ordenadores cerrados que sólo se podían comunicar con sistemas del mismo fabricante o proveedor. Sin embargo, pronto surgió la necesidad de intercomunicar no solo los sistemas de un mismo fabricante, sino también otros sistemas heterogéneos, dando lugar a una auténtica *Torre de Babel*. Para evitar los problemas derivados de los sistemas de comunicaciones propietarios surgieron diferentes estándares abiertos que pretendían mejorar la interoperabilidad entre sistemas de diferentes fabricantes.

El organismo internacional de normalización conocido como ISO (International Standards Organization: <http://www.iso.org>) definió el estándar de una arquitectura estructurada de comunicaciones o modelo básico de referencia OSI (*Open Systems Interconnection*) para la interconexión de sistemas abiertos. Este modelo de referencia OSI (ISO/IEC IS 7498), que se definió en 1978 y se publicó en 1982 por el comité técnico conjunto JTC1 (*Joint Technical Committee 1*) de ISO y Comité Electrotécnico Internacional (IEC o *International Electrotechnical Committee*), **describe cómo implementar una arquitectura estructurada en siete niveles de comunicaciones para interconectar sistemas finales heterogéneos.**

ISO pretendía que se implantara una red de redes OSI, parecida a lo que hoy es Internet, pero utilizando los protocolos OSI. La siguiente figura describe una hipotética red *onube* OSI formada por la interconexión de una serie de redes o *pequeñas nubes* físicas (redes de datos). Se asume que todas las computadoras *hablan* un mismo lenguaje de comunicaciones basándose en un conjunto de protocolos OSI.



Para interconectar las diferentes redes de comunicaciones, los sistemas intermedios que se emplean se denominan encaminadores o **routers**.

- **Nivel de Aplicación:** Es el nivel responsable de ejecutar las aplicaciones del usuario y de intercambiar mensajes entre dos aplicaciones iguales en diferentes sistemas.
- **Nivel de Presentación:** Ofrece independencia a las aplicaciones con respecto a la representación (sintaxis) de los datos.
- **Nivel de Sesión:** Se encarga de crear, gestionar y terminar las sesiones entre sistemas que se comunican.
- **Nivel de Transporte:** Realiza funciones de envío fiable de los datos extremo a extremo, se encarga de la recuperación de errores y de controlar el flujo de datos.
- **Nivel de Red:** Ofrece independencia a los niveles superiores acerca de las tecnologías utilizadas para interconectar los sistemas. También es el nivel responsable de establecer, mantener y finalizar conexiones.
- **Nivel de Enlace (de Datos):** Realiza funciones de transferencia fiable de información encada enlace entre nodos, incluyendo la sincronización, control de errores y control de flujo.
- **Nivel Físico:** Es el nivel responsable de la transmisión de los datos a través del medio físico, encargándose de las características físicas, mecánicas y eléctricas del acceso al mismo.

Dichos niveles también son referidos mediante la altura que ocupan en la arquitectura, desde el **nivel 1** que sería el nivel físico hasta el **nivel 7** que se corresponde con el nivel de aplicación.

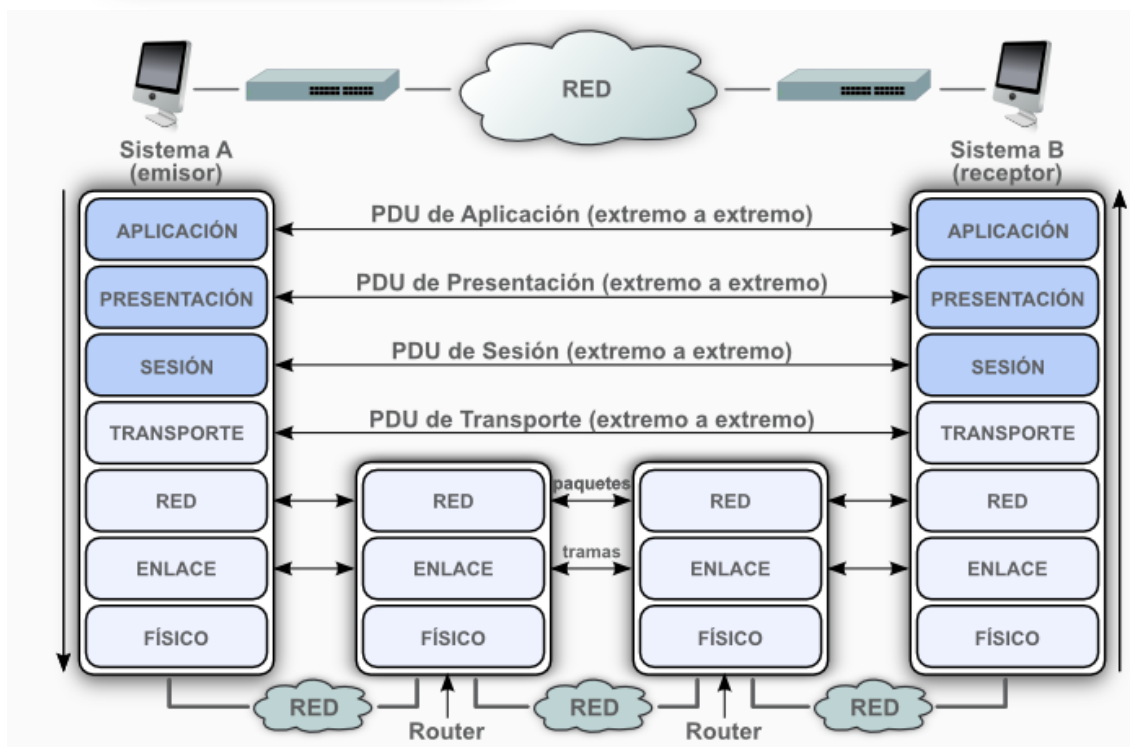
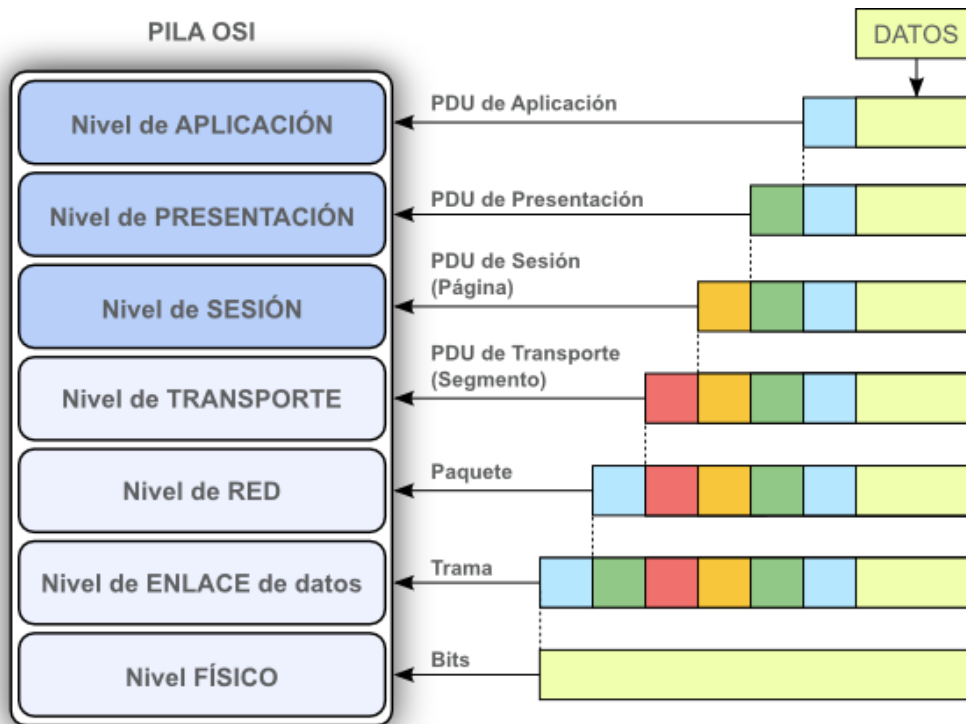
En la siguiente figura se muestran los **siete niveles** propuestos por la arquitectura OSI, así como las funciones fundamentales que se realizan en cada uno de ellos. Pasa el ratón por encima de cada uno de los niveles para obtener su descripción.

A la hora de transmitir información entre las distintas entidades pares se utilizan **PDU**s (*Protocol Data Unit*). Una PDU es la Unidad de Datos de Protocolo, o lo que es lo mismo, la unidad completa de información que incluye los datos de usuario más cierta información de control. Esta unidad es la que se intercambian dos entidades pares (del mismo tipo y nivel) según su protocolo (conjunto de reglas que rigen su diálogo) de comunicaciones.

La siguiente figura muestra cómo dos sistemas finales no vecinos, conectados a redes diferentes a través de dos routers o sistemas intermedios, se comunican mediante el modelo OSI. En dicha figura se puede observar cómo cada uno de los niveles del emisor intercambia PDUs de dicho nivel con su equivalente en el receptor. La PDU de un nivel n , PDU_n , se entrega al nivel inferior $n-1$ para su transmisión. El nivel $n-1$ genera una nueva PDU_{n-1} que incluye la PDU_n recibida más los datos necesarios para implementar el protocolo de nivel $n-1$.

PILA OSI





Como se puede apreciar, es necesario el uso de dispositivos intermedios enrutadores que conectan ambos sistemas y que pasan las PDU de una red a otra en función del sistema final destinatario. En el modelo OSI, los sistemas intermedios sólo implementan los 3 niveles inferiores dado que no son los destinatarios finales de la información. La comunicación en los niveles superiores se lleva a cabo de extremo a extremo, mientras que en los 3 primeros niveles, se realiza entre los sistemas finales y cada elemento intermedio.

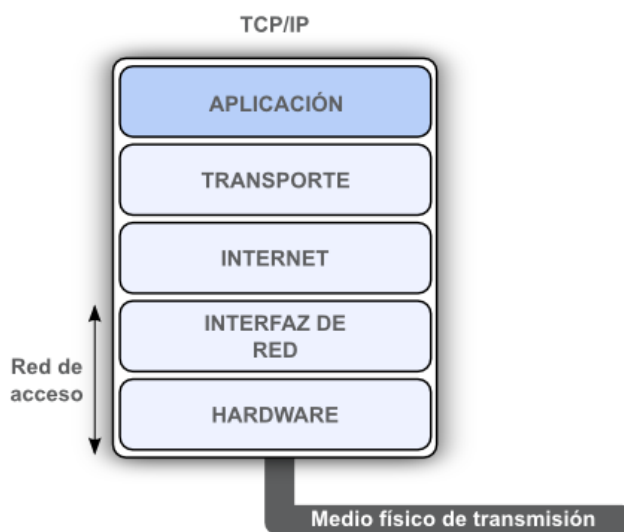
Si las redes interconectadas a través de sistemas intermedios son heterogéneas, las entidades del nivel de enlace del router se encargarán de realizar cierto trabajo extra, como

conversiones, extracciones y encapsulaciones del contenido del campo de datos de una unidad PDU del nivel de enlace a otra.

Arquitectura TCP/IP

El modelo OSI descrito anteriormente es un estándar aceptado y consensuado mundialmente. Sin embargo, éste modelo no se utiliza en la práctica. Existe otro modelo, denominado TCP/IP, que se emplea de forma global puesto que es el modelo en que se basa Internet. Este modelo *de facto* ha triunfado y se ha impuesto en Internet sin haber alcanzado los niveles de formalización y estandarización de OSI, modelo *de iure*.

Según se muestra en la figura de la derecha, la arquitectura TCP/IP se estructura en **cinco niveles** de comunicaciones. El nivel más bajo, o nivel físico o de hardware, viene definido por el hardware de acceso al medio físico de interconexión. Todos los niveles son mutuamente independientes en el sentido de que en cada nivel, a excepción del nivel físico, hay una o más entidades de software (es decir, uno o más módulos de software que emplean distintos protocolos para comunicarse con sus entidades pares) que son completamente diferentes del resto de niveles.



El nivel más alto, o Nivel de Aplicación, es el nivel con el que interactúan los usuarios, y contiene los protocolos, servicios y procesos enfocados a ser utilizados directamente por dichos usuarios. Cada una de estas aplicaciones utiliza una cabecera propia en los mensajes de aplicación que intercambia.

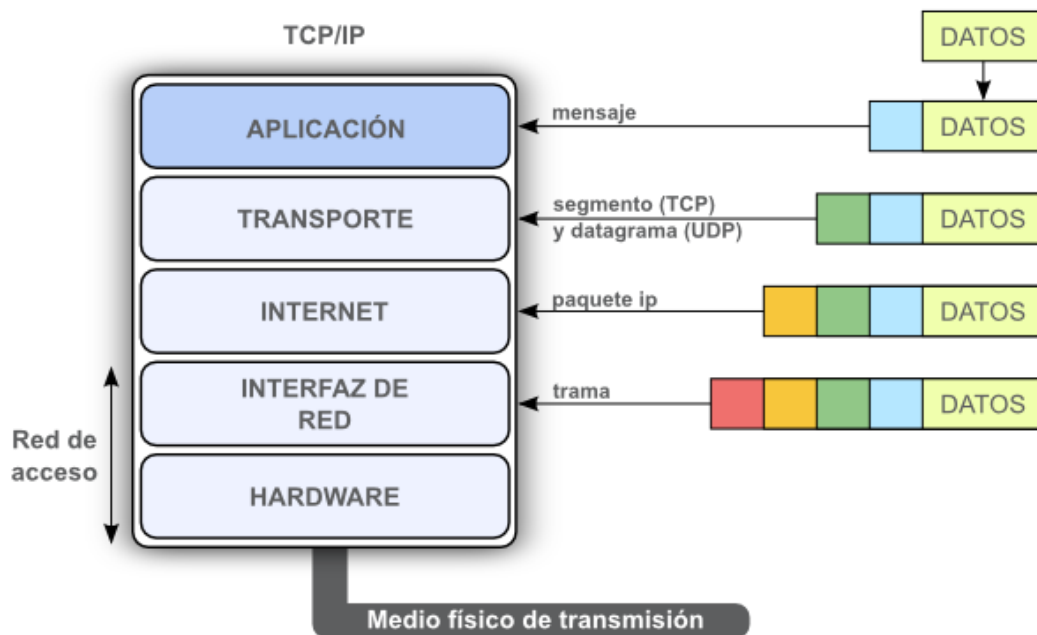
El Nivel de Transporte TCP/IP se encarga de transportar los mensajes de aplicación de extremo a extremo. En dicho nivel existen dos protocolos diferentes, TCP y UDP, manejados por dos entidades distintas que proporcionan dos servicios del nivel de transporte diferentes. La diferencia fundamental entre dichos protocolos radica en que TCP ofrece un servicio fiable, mientras que UDP realiza un transporte más rápido pero prescinde del control de errores y de flujo.

El siguiente nivel es el Nivel de Internet, que se encarga del encaminamiento o enrutado de los mensajes del nivel de transporte (segmentos TCP ó datagramas UDP), encapsulándolos en datagramas IP. Éste nivel se realiza fundamentalmente por el protocolo IP, aunque existen otros protocolos que colaboran con IP en su función.

El nivel de Interfaz de Red es el que se encarga de hacer llegar los datagramas IP en cada uno de los enlaces físicos. Es el nivel más bajo que se realiza por software.

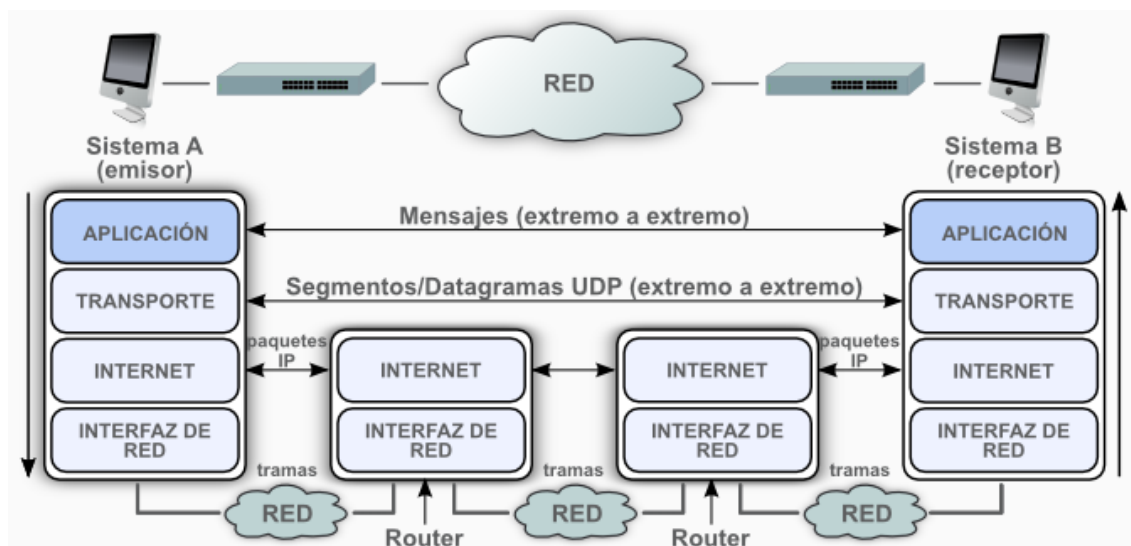
Finalmente, el nivel más bajo es el Nivel Físico o Nivel Hardware, encargado de controlar el acceso al medio físico. Éste nivel describe las características físicas, eléctricas y funcionales del acceso al medio físico.

Tal y como se puede observar en la siguiente figura, la arquitectura de comunicaciones TCP/IP se fundamenta en una técnica de estructuración o estratificación en cinco niveles de comunicaciones, los cuales implican el manejo de diferentes PDUs en cada uno de sus niveles de software de comunicaciones, a excepción de en el nivel físico, cuya unidad de datos es el bit.

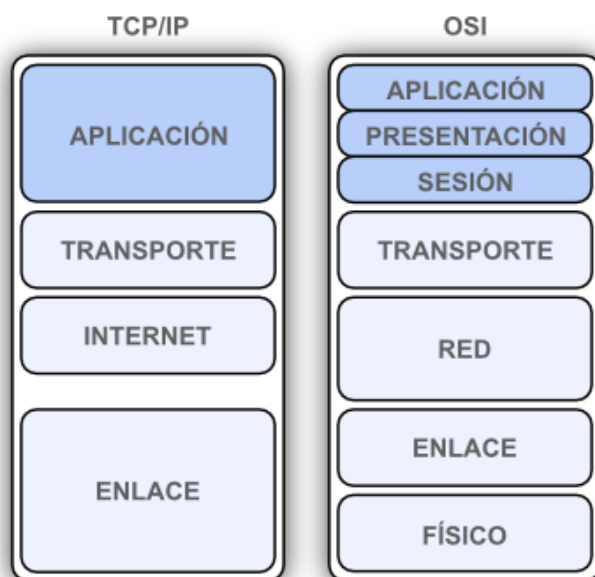


Se destaca que aunque la arquitectura TCP/IP está formada por muchos protocolos y no sólo por TCP (nivel de transporte) e IP (nivel de red), éstos dos protocolos dan nombre a toda la arquitectura de comunicaciones debido su relevancia.

A continuación se muestra cómo funcionaría la arquitectura TCP/IP en un ejemplo común de una red:



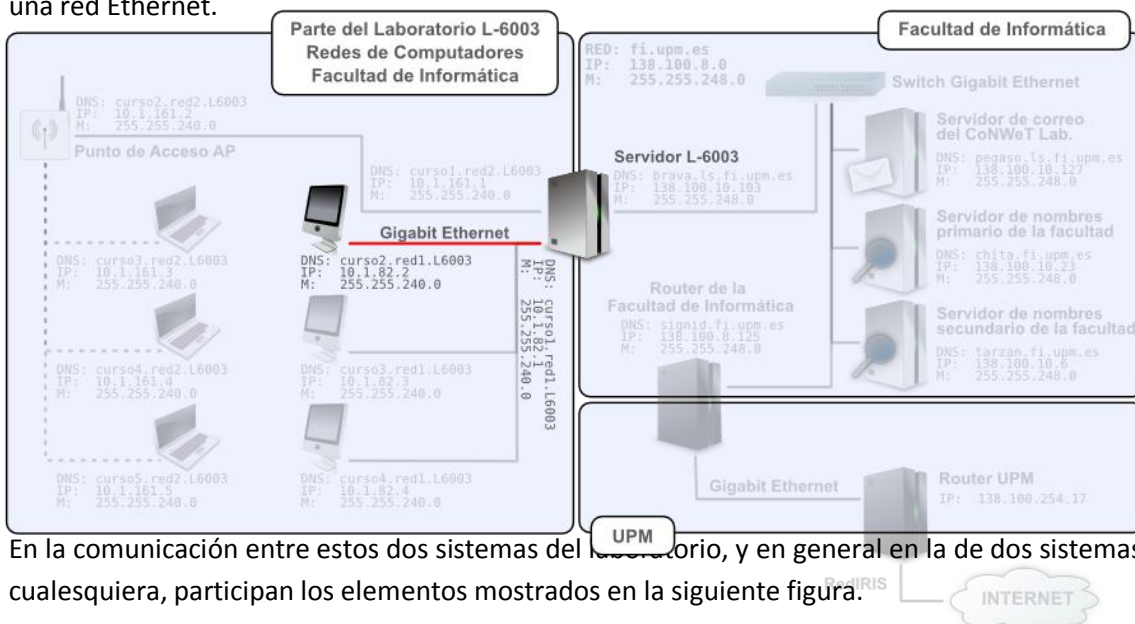
No existe una correlación directa entre los niveles de la arquitectura TCP/IP y los niveles del modelo OSI. No obstante sí es posible establecer una correspondencia entre las funciones llevadas a cabo por los niveles de ambos modelos, tal y como se muestra en la siguiente figura:

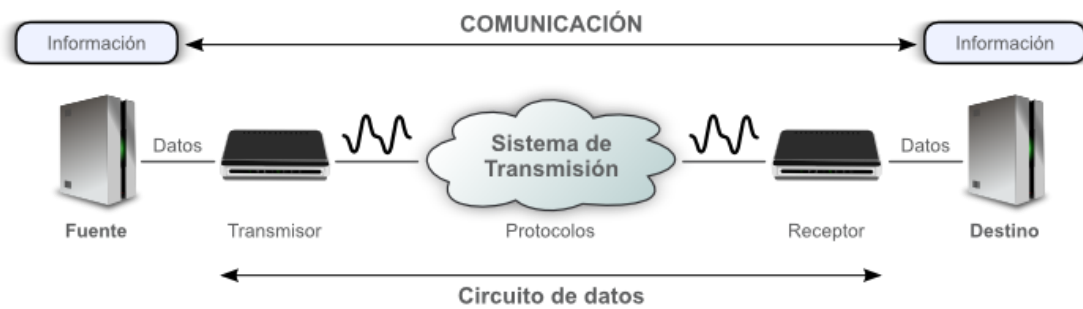


Conceptos básicos. Transmisión de datos

Una vez descrito cómo se intercomunican dos sistemas finales a través de una red, qué arquitecturas de comunicaciones se emplean, qué protocolos, qué técnicas de direccionamiento y qué elementos intermedios se requieren, a continuación se va a explicar **cómo se envían los datos físicamente** entre los distintos elementos, o lo que lo mismo, cuáles son los **aspectos de la transmisión física de la información**.

Si se observa el tramo representado en la siguiente figura, que une dos sistemas cualesquiera de la red de computadores del ejemplo inicial, se puede ver como un ordenador del laboratorio se conecta con el servidor presente en la misma sala, uniéndose a él a través de una red Ethernet.





Los **Equipos Terminales de Datos (ETD)** son los sistemas finales que participan en la comunicación. Por lo tanto, son aquellos que hacen de **fuentes** o **destinos** de la información.

La **fuentes** es todo sistema o recurso del que va a surgir determinada información, y más concretamente, los datos de una comunicación. Dichos datos se encaminan a un **destino**, que es el receptor final de la información.

Los **Equipos Terminales de Circuito de Datos (ETCD)** son aquellos sistemas encargados de transformar los datos de la fuente en señales adecuadas para poder transmitirlos a través del sistema de transmisión hasta el destino.

Los ETCDs pueden actuar como transmisores o receptores. Un **transmisor** es todo equipo que se encarga de enviar datos según un sistema de transmisión y empleando un protocolo acordado entre este equipo y el equipo **receptor**, que se encarga de recibir los datos e interpretarlos a través del protocolo de envío y el sistema de transmisión acordado.

Tanto en la figura como en las definiciones anteriores aparece el concepto de **comunicación**, que se define como el proceso mediante el cual se transmite información entre dos sistemas. Una comunicación no consiste únicamente en la transmisión de los datos. Los datos han de llegar íntegros al destino, solucionándose posibles problemas que puedan surgir en la transmisión como interferencias, ruido, pérdidas de información o errores. Además, y como es lógico, ambos extremos de la comunicación han de entender dichos datos de la misma forma.

Los **datos** a transmitir pueden ser analógicos o digitales. Los **datos analógicos** toman valores en un determinado intervalo continuo, como la temperatura medida por un sensor; sin embargo los **datos digitales** toman valores discretos, como los valores 0 ó 1, o los enteros de 0 a 255.

Para transmitir dichos datos se utilizan **señales electromagnéticas**, que son enviadas a través del medio o sistema de transmisión. Estas señales pueden ser también analógicas o digitales, pero es importante no confundirlas con los datos.

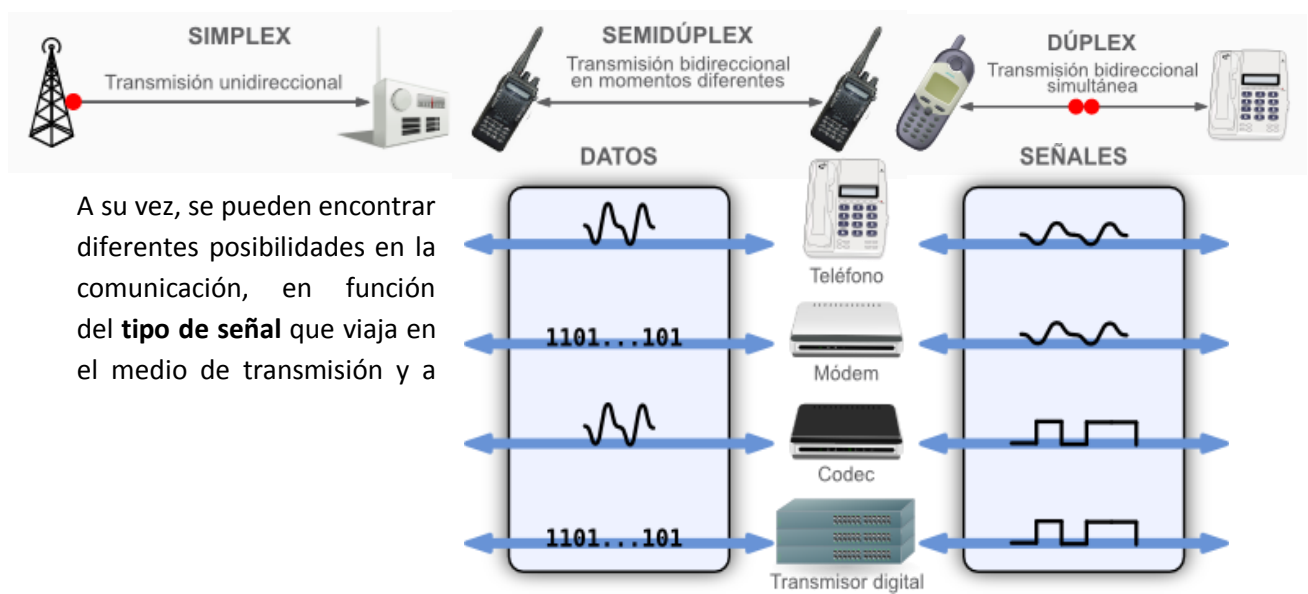
Las **señales analógicas** son aquellas señales representadas por funciones matemáticas que pueden tomar un número *infinito* de valores en cualquier intervalo de tiempo, es decir, que, en un instante cualquiera, pueden tomar un valor cualquiera, solo limitado por la potencia máxima de la señal a la que se puede transmitir. Los parámetros más significativos que definen una señal son la Amplitud (es el máximo valor que toma la señal respecto al origen), la Frecuencia (es el número de oscilaciones completas de la señal durante un cierto período de tiempo) y la Fase (indica el punto que ha alcanzado la señal en su ciclo).

Las **señales digitales** son aquellas que están representadas por funciones matemáticas que pueden tomar un número *finito* de valores en cualquier intervalo de tiempo, es decir, toman valores discretos.

La señal se transmite a través del **sistema de transmisión**, el cual puede ser desde una sencilla línea de transmisión hasta una compleja red que conecte fuente y destino. El tipo de señal que se transmite no depende de los datos recibidos, sino del medio físico de transmisión empleado. Unos datos analógicos pueden ser transmitidos tanto por señales analógicas como digitales, y lo mismo ocurre con los datos digitales, que pueden ser transmitidos utilizando tanto señales analógicas como digitales, siempre dependiendo del medio físico de transmisión utilizado, como por ejemplo:

- Par trenzado
- Cable coaxial
- Fibra óptica
- Medios inalámbricos
- Los **medios de transmisión** se pueden clasificar en función de distintos aspectos:
- En función de la **naturaleza** del medio de transmisión, el sistema de transmisión puede ser **guiado** o **no guiado**.
- En función de la **disposición física** de los elementos del sistema, puede ser un sistema **punto a punto** o **multipunto**.
- En función del **intercambio de datos**, puede ser una transmisión **símplex**, **semidúplex** o **dúplex**.
- En función del **tipo de señal** que viaja en el medio de transmisión, la transmisión puede ser **analógica** o **digital**.
- Existen en la práctica tres modos básicos de intercambio de datos:
- En una transmisión simplex las señales se transmiten en una sola dirección, por lo que una estación es siempre transmisora y la otra siempre receptora.
- En las transmisiones semidúplex, ambas estaciones pueden transmitir, pero no simultáneamente
- Por último, en las transmisiones dúplex, las estaciones pueden transmitir de forma simultánea.

Para ver de forma gráfica las diferencias entre transmisión símplex, semidúplex y dúplex, seleccione a continuación cualquiera de ellas.



las características de la señal manejada por el transmisor y el receptor. La siguiente de la derecha muestra estas diferentes opciones.

En la transmisión de cualquier tipo de señal sobre un medio de transmisión, existen una serie de factores que hay que tener en cuenta: la **potencia** empleada para transmitir la señal, la **banda de frecuencias** en que se transmite la señal, la cantidad máxima de **ruido** admisible, etc. Estos factores limitan la distancia máxima a la que se pueda reconocer la señal, a la máxima velocidad alcanzable.

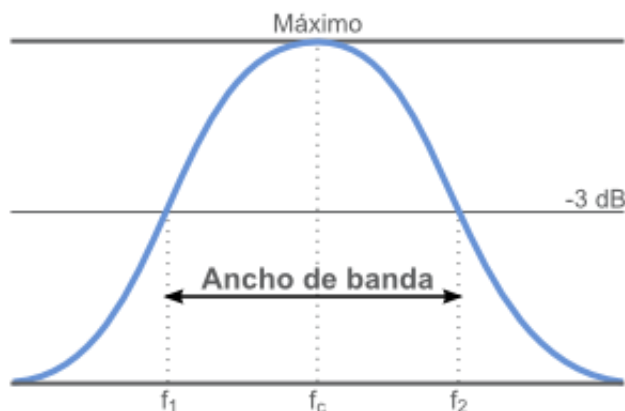
En los siguientes apartados se definen una serie de características propias del sistema de transmisión, las cuales van a permitir definirlo y categorizarlo dentro de las distintas posibilidades existentes. Estas características son el **ancho de banda**, la **velocidad de señalización**, el **ruido** existente en un canal, y la **capacidad** de dicho canal.

Ancho de Banda

Una de las características principales de un medio de transmisión es la cantidad de información que éste puede transmitir en un momento dado, lo que está limitado por su **ancho de banda**.

El ancho de banda en una señal analógica es la longitud, medida en *Hz*, del rango de frecuencias en el que se concentra la mayor parte de la energía de la señal.

Se define como **espectro** de una señal analógica al conjunto de frecuencias que la constituyen. La anchura de este espectro se denomina **ancho de banda**.



El rango de frecuencias contenido en una señal compuesta es el ancho de banda de dicha señal, el cual es normalmente la diferencia entre dos valores, la frecuencia más alta y la más baja contenidas en la señal. Si por ejemplo una señal contiene frecuencias entre 1000 y 5000 Hz, su ancho de banda es $5000 - 1000 = 4000\text{ Hz}$.

La **frecuencia** es la magnitud física que mide las veces por unidad de tiempo en que se repite un ciclo de una señal.

Una señal de una sola frecuencia tiene un ancho de banda mínimo. En general, si la señal tiene componentes en varias frecuencias, su ancho de banda es mayor, y su variación temporal depende de sus componentes en frecuencias. Normalmente, las señales generadas en los sistemas electrónicos, ya sean datos informáticos, voz, señales de televisión, etc., son señales que varían en el tiempo, pero se pueden caracterizar como la suma de muchas señales de diferentes frecuencias.

En la figura inicial de esta sección se observa una línea de red Ethernet de 1Gbps, que puede (teóricamente) enviar 1.000.000 bits (no bytes) por segundo. Esto es en realidad la tasa de transferencia máxima permitida por el sistema, que depende del ancho de banda analógico, de la potencia de la señal, de la potencia de ruido y de la codificación de canal.

Velocidad de Transmisión y Velocidad de Señalización

Otra de las características fundamentales de un medio de transmisión es la cantidad de información que se transmite por unidad de tiempo, que se conoce como velocidad de transmisión de la información.

La **Velocidad de Transmisión** es el número de bits enviados durante un periodo de tiempo, y representa la velocidad a la que se puede transmitir la información. La Velocidad de Transmisión es igual a $1/T$ siendo T el tiempo necesario para transmitir 1 bit. La velocidad de transmisión se mide en bits por segundo (*Bits/s* ó *bps*).

$$C = \frac{1}{T} bps$$

Otro concepto fundamental de un medio de transmisión, que no conviene confundir con la velocidad de transmisión, es la llamada velocidad de señalización.

La **Velocidad de Señalización** es el número de cambios de estado que puede sufrir la señal por unidad de tiempo. La Velocidad de Señalización es la inversa de T_s , siendo T_s el tiempo mínimo entre dos cambios de la señal. La Velocidad de Señalización se mide en *baudios*.

$$V = \frac{1}{T_s} \text{baudios}$$

Ambas velocidades están relacionadas pero representan conceptos distintos. Su relación se encuentra en el número de bits de información que transporta cada cambio de señal, y que se denotará como n . Este número depende del conjunto de estados o valores que puede tomar la señal. Cuanto mayor sea el número de estados distintos que pueda tomar la señal (que se denotará N), mayor cantidad de información se transmite en cada cambio de estado. En concreto, el número de bits transmitidos por cada cambio de la señal es

$$n = \log_2 N$$

De esta forma, la velocidad de transmisión (medida en *bps*) se puede obtener como la velocidad de señalización (en *baudios*) multiplicada por el número de bits transmitidos en cada cambio de señal:

$$C = V \times \log_2 N$$

Por lo tanto, no se debe confundir la velocidad en baudios con la velocidad en bits por segundo, ya que cada cambio de señal puede transportar menos de uno, uno o más bits. Por ejemplo, si la señal puede tomar 4 valores, éstos pueden ser codificados con 2 bits {00, 01, 10, 11} ya que $2 = \log_2 4$, y cada cambio de señalización se traduce en el envío de 2 bits. En este

caso la velocidad de transmisión (en bits por segundo) será el doble de la velocidad de señalización (en baudios).

Perturbaciones en la transmisión

En todo sistema de transmisión, la señal que se recibe en destino no es exactamente igual a la señal que se transmitió, puesto que pueden surgir **perturbaciones** en la transmisión. Estas perturbaciones pueden ser atenuaciones, distorsiones o ruido:

- Una **atenuación** consiste en la disminución en *amplitud* de la corriente o potencia de una señal durante su transmisión entre dos puntos. Cuando una señal se desplaza por el medio físico, pierde parte de su fuerza electromagnética para vencer la resistencia del medio de transmisión. Esto produce que la señal recibida sea más tenue, y que a menudo sea necesario emplear amplificadores.

La atenuación de la señal se mide en *decibelios*, y mide la potencia relativa de la señal en dos puntos distintos, 1 y 2. La atenuación se expresa como:

$$atenuación_{(dB)} = 10 \times \log_{10} \frac{Pot_2}{Pot_1}$$

siendo el punto 2 más lejano respecto del origen que el punto 1, por lo que $Pot_2 < Pot_1$

- Otro tipo de perturbación es la **distorsión**, que se produce debido a que el medio físico se comporta de forma diferente para señales de distinta frecuencia (diferentes atenuaciones y/o velocidades de propagación). La distorsión se produce en una señal compuesta, formada por varias frecuencias.
- Por último, el **ruido** consiste en que señales no deseadas que pueden combinarse con la señal transmitida, y que por tanto provocan que la señal recibida sea diferente a la que se ha enviado. Para cuantificar el grado en que este ruido puede afectar a una transmisión, se emplea el concepto de **relación señal/ruido (S/R)**, la cual define la potencia relativa entre la señal y el ruido medidos en un punto determinado del medio de transmisión. La relación señal/ruido se expresa en decibelios y se calcula con la siguiente fórmula:

$$S/R_{(dB)} = 10 \times \log_{10} \frac{Pot_{señal}}{Pot_{ruido}}$$

De esta forma, una S/R alta implica un bajo nivel de ruido, y por tanto una buena calidad de la señal.

Capacidad de un canal

La **capacidad de un canal** se define como la velocidad máxima a la que se puede transmitir por dicho canal bajo unas condiciones dadas. Se mide en bits por segundo (*bps*) y depende del ancho de banda disponible y de la calidad de dicho canal (e.g: ruido).

A la hora de determinar la capacidad de un canal existen dos teoremas que permiten establecerla en función de las características del mismo. El *teorema de Nyquist* establece cuál

es la capacidad máxima de un canal ideal en el que no existe ruido, mientras que el *teorema de Shannon* tiene en cuenta la relación señal/ruido del canal.

Canales sin ruido (Teorema de Nyquist)

El teorema de *Nyquist* define la máxima velocidad de transmisión teórica para canales sin ruido, en los que la única limitación viene impuesta por el ancho de banda del canal. *Nyquist* demostró que dado un canal con ancho de banda W , la máxima velocidad de transmisión de la señal que se puede alcanzar es de $2W$.

Si la señal es binaria, el teorema de *Nyquist* demostró que por un canal ideal de ancho de banda W se puede transmitir información digital a una velocidad máxima de $V = 2W$ bps.

Si se emplean sistemas de codificación de datos que permitan transmitir varios bits por cada nivel de la señal, la capacidad del canal puede expresarse como:

$$C = 2 \times W \times \log_2 N \text{ bps}$$

Donde N es el número de niveles que puede tomar la señal.

Por tanto, según las expresiones anteriores, se puede incrementar la capacidad del canal incrementando el ancho de banda o el número de niveles de la señal.

Canales con ruido (Teorema de Shannon)

Sin embargo, la realidad demuestra que todos los canales tienen ruido. La relación señal/ruido de un canal es el parámetro que influye en la máxima velocidad de transmisión por dicho canal. El teorema de *Shannon*, basándose en el teorema de *Nyquist*, definió una fórmula para determinar la máxima capacidad teórica de un canal en función del ancho de banda del medio y de la relación señal/ruido del mismo. Según *Shannon*, la máxima capacidad de un canal se obtiene de la siguiente manera. Partiendo del teorema de *Nyquist*, $C = 2 \times W \times \log_2 N$ bps, como el número de niveles transmitidos se ve limitado por el ruido, *Shannon* estableció que el número de niveles significativos es:

$$N = \sqrt{1 + S/R}$$

Si se sustituye dicha expresión en la fórmula de *Nyquist* se deduce que:

$$C = 2 \times W \times \log_2 (1 + S/R)^{1/2} \text{ bps}$$

fórmula que si se simplifica se obtiene:

$$C = W \times \log_2 (1 + S/R) \text{ bps}$$

Para un ancho de banda determinado, es deseable obtener la mayor velocidad de transmisión posible pero de forma que no se supere la tasa de errores aconsejable. Para conseguir esto, el mayor inconveniente es el ruido. Si el nivel de ruido fuese nulo (relación señal/ruido infinita), el número de niveles podría ser tan grande como se deseara, ya que siempre se podría distinguir entre un nivel y otros por próximos que estuvieran. Pero si el ruido no es nulo, es decir, el caso real, el número de niveles queda limitado por la posibilidad de cometer un error al decidir entre uno u otro nivel.

Técnicas de transmisión y conmutación de datos

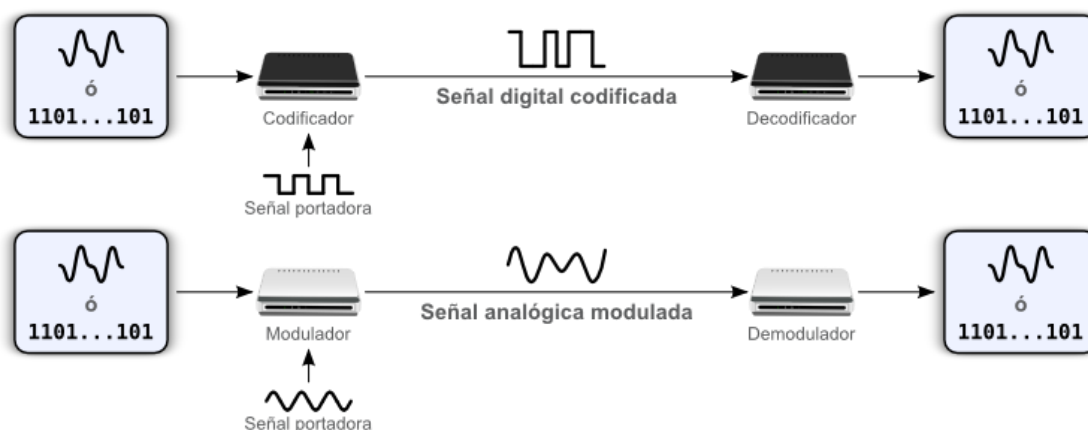
Técnicas de transmisión

Introducción a las técnicas de transmisión

Tanto la información analógica como la digital pueden ser transmitidas mediante señales analógicas o digitales. La elección de un tipo particular de señalización dependerá de los requisitos exigidos, del medio de transmisión, así como de los recursos disponibles para la comunicación, pero no del tipo de información a transmitir.

De esta forma, datos de tipo analógico pueden transmitirse mediante una señal analógica o digital, y datos digitales puede igualmente transmitirse mediante ambos tipos de señales. Cuando se emplean señales analógicas, la transmisión en sí recibe el nombre de **transmisión analógica**, mientras que si se emplean señales digitales se denomina **transmisión digital**.

En la siguiente figura se muestran estos dos tipos de transmisiones, así como los elementos que intervienen en ellas.



Transmisión digital

La transmisión digital consiste en el envío de información a través de medios de comunicaciones físicos en forma de señales digitales. Una señal digital es una secuencia de pulsos de tensión discretos y discontinuos. Cada uno de los pulsos es un elemento de la señal.

En la transmisión digital, una fuente de datos (que puede ser analógica o digital) es **codificada** en una señal digital. La forma real de la señal digital a transmitir depende de la técnica de codificación que se elige para optimizar el uso del medio de transmisión.

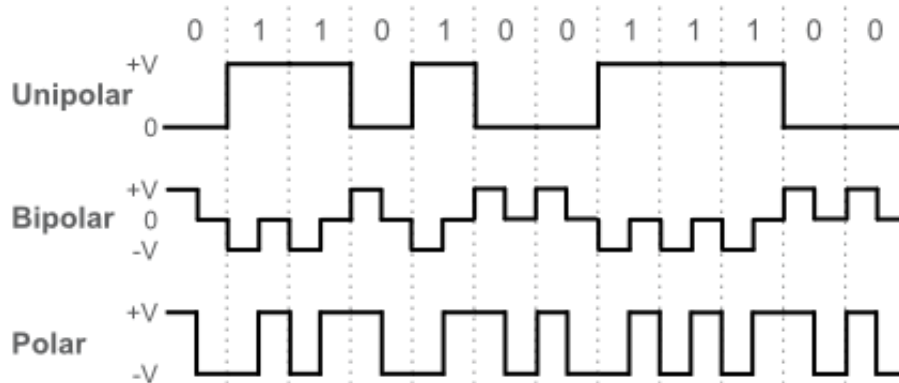
Se define la **codificación** como el proceso que establece la correspondencia entre los datos a enviar y los elementos de la señal digital transmitida.

Transmisión digital de datos digitales

A continuación se examinarán las técnicas de codificación involucradas para la transmisión de datos digitales en una transmisión digital. Los datos binarios son transmitidos codificando cada bit de datos en elementos de la señal.

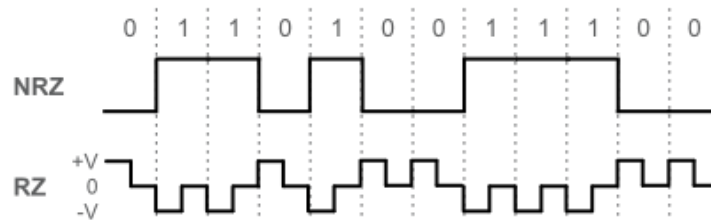
En primer lugar, se va a introducir un poco de terminología. En función de los niveles de corriente utilizados para representar los valores, la codificación puede ser de distintos tipos o esquemas:

- **Unipolar:** esquema en el que un valor (por ejemplo, 1) es representado por un valor de señal distinto de 0, mientras que una señal a 0 representa el otro valor (por ejemplo, el 0).
- **Polar:** esquema que utiliza dos valores de voltaje distintos de cero, generalmente uno positivo y otro negativo, para representar los valores binarios
- **Bipolar:** esquema que emplea 3 niveles distintos de voltaje, dos niveles opuestos y un nivel neutro al que retornar.



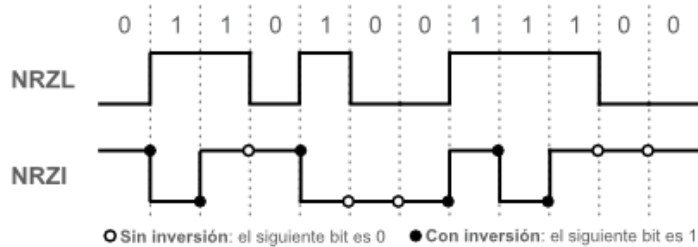
Estos esquemas no definen cómo se codifican los datos. Para ello existen multitud de **métodos de codificación** que indican cómo se utilizan los diferentes valores de la señal, donde los más usuales son los siguientes.

- **NRZ (No Return to Zero):** La forma más frecuente de transmitir señales digitales es mediante la utilización de un nivel de tensión diferente para cada dígito binario. Cada nivel lógico 0 y 1 toma un valor distinto de tensión, que se mantiene constante durante la duración del bit. Hay dos variantes de los códigos de NRZ
- **RZ (Return to Zero):** El principal problema que surge en la codificación NRZ ocurre cuando se intenta transmitir una larga secuencia de bits que no producen transiciones en la señal, lo que provoca que el emisor y el receptor pierdan la sincronización. Para solucionarlo, la técnica RZ fuerza que haya cambios en la señal durante cada bit. Si el bit es uno, la primera mitad de la celda estará a V. Si el bit es cero, la primera mitad de la celda estará a algún valor de tensión distinto de V (dependiendo de la codificación usada). La señal vale cero en cualquier otro caso.



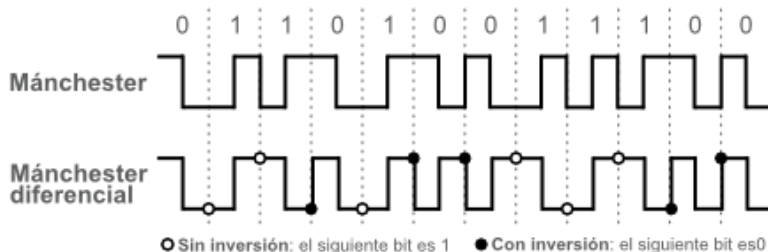
Los códigos NRZ pueden ser de dos tipos:

- **NRZL**: El voltaje determina el valor del bit.
- **NRZI** (*No Return to Zero Inverted*): La señal no cambia si se transmite un cero, y se invierte si se transmite un uno.



Otros métodos de codificación son los que utilizan 2 fases. Su inconveniente es el de requerir el doble de ancho de banda.

- **Mánchester**: Los valores lógicos no se representan como niveles de la señal, sino como transiciones en mitad del bit. Una transición de bajada de tensión representa un cero y una transición de subida representa un uno. Esta codificación siempre presenta un cambio de señal en mitad del intervalo, lo que sirve para ofrecer **sincronización** junto con la señal de datos. De esta manera, la señal le ofrece al receptor unos datos y además un mecanismo de sincronización.
- **Mánchester diferencial**: En esta técnica la transición a mitad del intervalo se utiliza tan sólo para proporcionar **sincronización**. La codificación del dato binario se representa por la presencia o ausencia de una transición al comienzo del bit: si el siguiente bit es 0, hay una transición; si el siguiente bit es 1, no la hay.



Transmisión digital de datos analógicos

En este apartado se estudia la conversión de datos analógicos en señales digitales. Este proceso se denomina digitalización y puede realizarse mediante el mecanismo de **Modulación por Impulsos Codificados (MIC, o PCM del inglés Pulse Code Modulation)**.

Se quiere transmitir un dato analógico que viene dado por una función continua en el tiempo (por ejemplo voz, audio, mediciones de sensores, etc.).

A esta señal analógica es preciso someterla primero a un proceso de **muestreo**. Es obvio que no se puede representar por impulsos el valor de la señal en todos los instantes, puesto que se obtendría un espectro continuo (números reales), confundándose unos impulsos con otros. Se deben elegir ciertos puntos de esa señal, separados por cierto intervalo de tiempo, y

representar la amplitud que en ese momento tenga mediante un impulso cuya amplitud sea proporcional a ella.

Es importante destacar que si el muestreo se realiza de forma correcta, las muestras no sólo representan una buena aproximación de la señal original, sino que contienen absolutamente toda la información de esa señal.

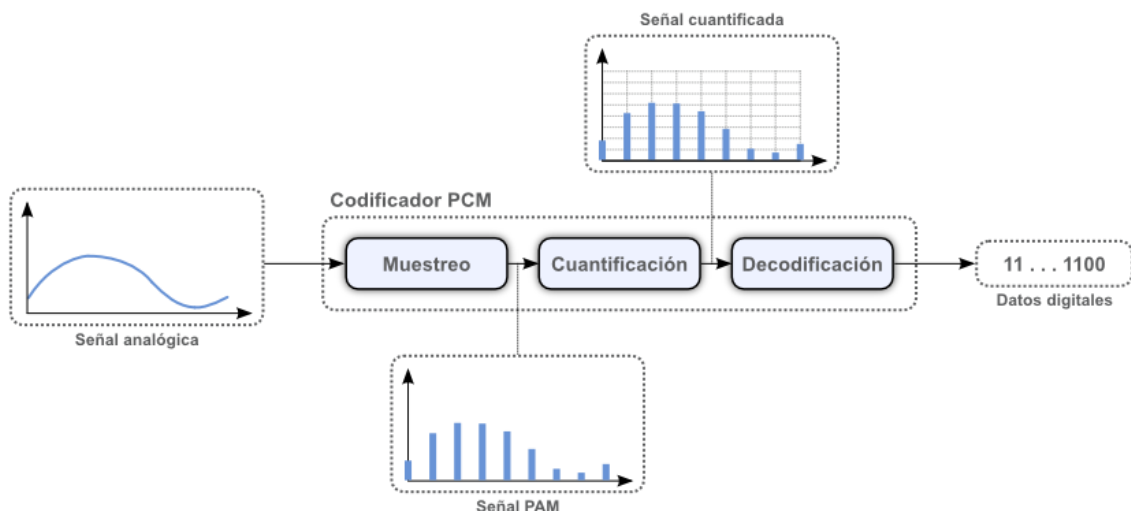
Esto queda reflejado en el **teorema de la teoría de muestreo**, según el cual, si una información que es una magnitud expresada como una función continua en el tiempo, se muestrea instantáneamente a intervalos regulares a una frecuencia que sea al menos dos veces la frecuencia más alta de dicha información, las muestras obtenidas contienen toda la información original.

$$f = 2W$$

El paso siguiente es la operación de **cuantificación**. El conjunto de impulsos modulados en amplitud, que se obtiene como consecuencia del muestreo, presenta la característica de que la amplitud de tales impulsos varía de forma analógica, o lo que es lo mismo, pudiendo adoptar cualquier valor. Esto representa un importante inconveniente a la hora de asignar una palabra del código utilizado que represente cada una de esas amplitudes, ya que se precisaría un sistema de codificación con infinitos valores posibles. Hay que conseguir que sólo exista un número discreto o finito de posibles valores, y para ello se deben cuantificar tales amplitudes. Esta operación introduce una inevitable *distorsión*, tanto mayor cuanto más elevado sea el intervalo entre valores cuánticos contiguos. Esta distorsión, no obstante, está perfectamente controlada, puesto que tendrá un valor constante en función de la escala de cuantificación que se elija, y bastará entonces con mantenerlo por debajo del límite que se estime conveniente, y que puede ser tan pequeño como se desee.

Por último, la tercera operación básica es la **codificación**. Consiste en sustituir cada valor cuántico (entero) resultante del proceso de cuantificación por una palabra del código de n bits de transmisión y se manda por la línea. Se obtiene así, por último, un tren de impulsos de amplitud fija.

El **códec** es el dispositivo encargado de realizar las tres etapas descritas: muestreo, cuantificación y codificación.



Al número de bits que transmite el códec en este proceso se le denomina **régimen binario**, que corresponde al número de bits que se transmiten por segundo a través del enlace de datos.

$$R_b = f \times \text{número de bits/muestra bps}$$

donde f hace referencia a la frecuencia de muestreo.

Transmisión analógica

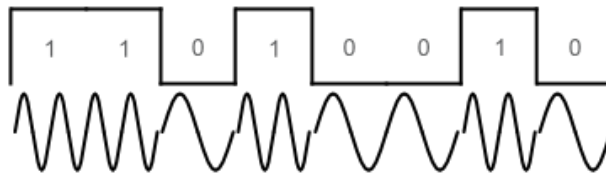
La transmisión analógica consiste en el envío de información en forma de señales analógicas a través del medio físico. La fuente dispone de una serie de datos que se van a transformar en una señal digital, se transmiten a través de una **onda portadora**, cuyo único objetivo es transportar datos modificando una de sus características (amplitud, frecuencia o fase).

El proceso por el cual se obtiene una señal analógica a partir de unos datos digitales es conocido como **modulación**. Esta señal modulada se transmite y el receptor debe realizar el proceso contrario, denominado **demodulación**, para recuperar la información.

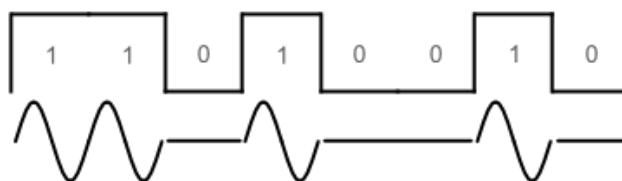
Transmisión analógica de datos digitales

En primer lugar, se va a considerar un escenario donde los datos de la fuente son digitales, y se van a transmitir señales analógicas por el sistema de transmisión. El **módem** es el encargado de modular los datos de la fuente, y para ello empleará algún esquema de modulación que involucrará a uno o más de los parámetros característicos de la señal portadora: la amplitud, la frecuencia y la fase. Algunos esquemas simples de modulación son:

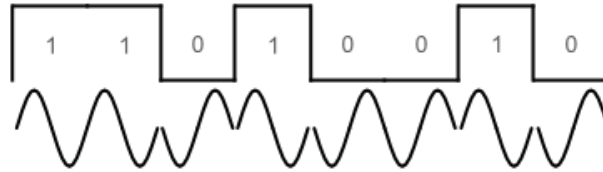
- **FSK**(Modulación por desplazamiento de la frecuencia): en ella los dos valores binarios, 0 y 1, se representan mediante dos frecuencias diferentes próximas a la frecuencia portadora. Se modifica por tanto la frecuencia de la portadora según el valor de bit a transmitir.



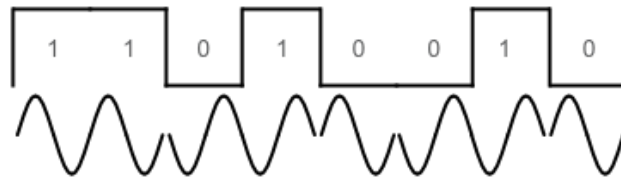
- En **ASK**(Modulación por desplazamiento de la amplitud), los dos valores binarios se representan mediante dos amplitudes diferentes de la portadora. Es usual que una de las amplitudes sea cero, y de esta forma, un dígito binario se representará mediante la presencia de una portadora de amplitud constante, y el otro mediante la ausencia de portadora. La técnica ASK suele emplearse para transmitir datos digitales en fibras ópticas.



- En el esquema **PSK**(Modulación por desplazamiento de fase), la fase de la señal portadora se desplaza para representar los datos digitales. La frecuencia y la amplitud se mantienen constantes mientras que la fase de la portadora se varía para representar los bits uno y cero con distintos ángulos de fase. Para representar los dos datos digitales se utiliza una señal, y la misma señal desfasada 180°.

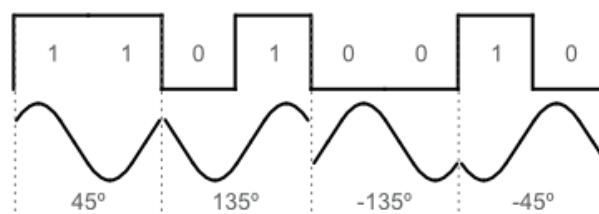


- DPSK**(Modulación diferencial por desplazamiento de fase): es una variante de PSK en el que la fase que representa un bit depende de la fase del bit anterior. Por ejemplo, la representación de un bit 0 provoca un desfase de 180° a la portadora, mientras que la representación de un bit 1 no realiza cambios en la portadora.



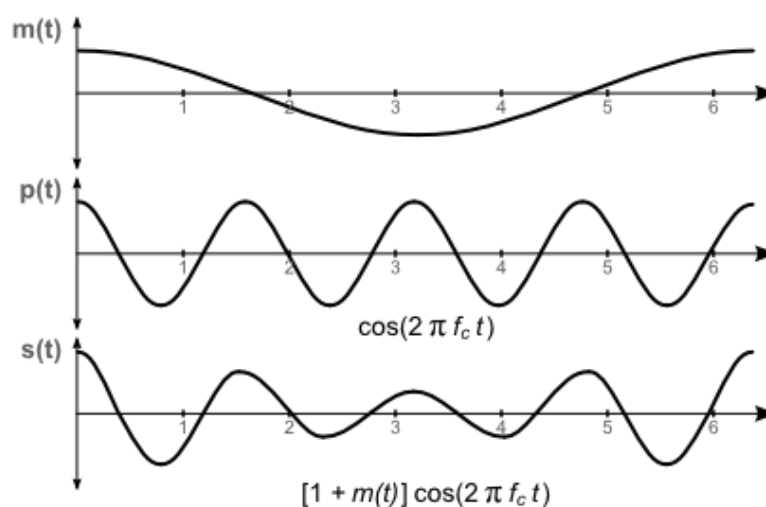
Todas las técnicas de modulación enumeradas hasta ahora se denominan **simples**, y en ellas los cambios de algún parámetro de la señal portadora sirven para distinguir dos valores lógicos, por lo que transmite un bit de información. No obstante, se hace imprescindible aumentar la eficacia de la transmisión, y por ello, surgen distintas técnicas de **modulación multinivel** que permiten transmitir más de 1 bit en cada cambio de parámetro de la onda portadora. De entre las técnicas multinivel existentes, las más importantes son:

- QUAM** (Modulación de amplitud en cuadratura): La modulación en cuadratura es una técnica en la cual se transmiten dos señales portadoras, sobre la misma línea; para que las señales no interfieran se envían con un desfase de 90 grados, de donde viene el nombre de cuadratura. Cada señal portadora transporta parte de la información mediante la modulación pertinente. Esto permite alcanzar velocidades mayores de transmisión de datos. QUAM, combina la PSK con la modulación en amplitud ASK.
- QPSK** (PSK en cuadratura): Utiliza dos modulaciones PSK separadas, una en fase (fase 0°) que codifica los bits pares, y otra desfasada un cuarto de fase (90°), y que codifica el resto de bits (los impares). El resultado de la suma de ambas señales es una única onda sinusoidal, pero con desfases de 45°, -45°, 135° y -135°. Puesto que hay 4 fases distintas, cada cambio de fase representa dos bits, por lo que se envían 2 bits por cada cambio de señal.



Transmisión analógica de datos analógicos

También existe, obviamente, la posibilidad de enviar **datos analógicos** mediante una transmisión analógica. Este tipo de transmisión se refiere a un esquema en el que los datos que serán transmitidos ya están en formato analógico. Las técnicas empleadas para llevar a cabo este tipo de transmisión analógica son equiparables a las explicadas para datos digitales. Para transmitir la señal analógica de la fuente, el Equipo Terminal de Circuito de Datos debe combinar continuamente la señal que será transmitida y la onda portadora, de manera que la onda que transmitirá será una combinación de la onda portadora y la señal transmitida (como ejemplos de este tipo de modulaciones se pueden citar las modulaciones AM y FM usadas en las emisoras de radio). En la siguiente figura se muestra un ejemplo del funcionamiento de la modulación AM.



Codificación multinivel

Al igual que las transmisiones analógicas de datos digitales pueden utilizar más de 2 niveles para transmitir mayor información en cada cambio de señal, en las transmisiones digitales también surge la necesidad de aumentar la eficacia de la transmisión. Es por ello que surgen distintas técnicas de codificación que sirven para transmitir varios bits de la fuente en cada bit transmitido por el codificador. Estos métodos se denominan multinivel porque utilizan una combinación de técnicas de modulación con el propósito de transmitir varios bits por baudio.

Estos métodos consisten en dividir el flujo de datos en grupos de m bits, y sustituir estos m bits por n bits. El grupo de m bits se denomina palabra, mientras que el grupo de n bits resultante se denomina código.

Este tipo de esquemas utiliza más de dos valores discretos para representar la información. Se denominan siguiendo un esquema de nombrado común, formado por dígitos y letras de la forma **mBnL**, donde m es el número de símbolos de B valores de entrada, y n es el número de símbolos de L valores de salida. B o L son letras que representan **símbolos binarios** (B), **ternarios** (T) o **cuaternarios** (Q). Entre los más utilizados están el esquema 2B1Q, que recibe dos símbolos binarios y genera un símbolo cuaternario, 4B5B, que genera 5 símbolos

binarios partiendo de 4 símbolos también binarios; 8B6T, que para cada 8 bits de entrada genera 6 símbolos ternarios.

Otro tipo de codificación multiniveles la llamada codificación en rejilla. Esta codificación permite corregir errores de transmisión, que son más frecuentes en codificaciones multinivel porque la diferencia entre elementos de información es mínima. El propósito de la modulación en rejilla es aumentar la fiabilidad de la transmisión, y para esto añade un bit redundante a cada símbolo; este bit se emplea para incrementar la relación señal/ruido efectiva. Algunos módems utilizan codificación en rejilla para incrementar la inmunidad al ruido en la red telefónica conmutada. A 9,6 kbps se pueden transmitir 32 símbolos de cinco bits con codificación en rejilla pero, cuando operan a 4,8 kbps, la codificación en rejilla se elimina para transmitir 16 símbolos de cuatro bits. La modulación con codificación en rejilla tolera más del doble de potencia de ruido que otras técnicas, pero exige, para implementar la codificación, procesadores de señal de alto rendimiento. El uso combinado de canceladores de eco para operación en dúplex sobre circuito a dos hilos de la red telefónica conmutada encarece bastante este tipo de módems.

Distribución del ancho de banda

En la vida real, una propiedad característica de los enlaces existentes es que tienen el ancho de banda limitado. Esta propiedad, junto con el hecho de que el coste de implantación de un enlace no suele ser barato (es suficiente con pensar lo que pueden costar los enlaces que unen Europa con Estados Unidos, formados por un gran cable submarino que cruza el océano Atlántico), conlleva que la utilización eficiente del ancho de banda se convierta en un aspecto clave dentro de las Redes de Computadores.

Esta limitación del ancho de banda viene impuesta por las características físicas propias del enlace (no es lo mismo utilizar un cable coaxial que fibra óptica o un enlace inalámbrico), pero dicho tope nunca se alcanza y ocurre que el enlace dispone de más capacidad que la necesitada por los dispositivos conectados al mismo, con lo que se está malgastando la capacidad sobrante. Esta situación provoca un grave problema al desaprovecharse ancho de banda, uno de los recursos más preciados en las comunicaciones de datos.

Para optimizar el uso de la capacidad del enlace, en determinadas ocasiones se puede necesitar combinar varios canales de bajo ancho de banda para dar forma a un canal con un ancho de banda mayor. En otras, sin embargo, lo que se busca es evitar al máximo las interferencias y garantizar que los datos llegan a su destino sin ser interceptados por usuarios intermedios. Para dar respuesta a estas necesidades existen dos mecanismos fundamentales: la **multiplexación** y el **espectro expandido**.

Multiplexación

La multiplexación es una técnica que permite combinar las señales de varias fuentes para conseguir un uso *eficiente* del ancho de banda. En otras palabras, es una técnica que permite transmitir de forma simultánea múltiples señales analógicas o digitales a través de la compartición de un único enlace de datos, aprovechando al máximo la capacidad del mismo.

Para llevar a cabo esta tarea se emplea un dispositivo conocido como *multiplexor*, el cual combina los flujos de las diferentes líneas de entrada en un único flujo (*multiplexación*), y los

separa de nuevo los flujos y los redirige a sus correspondientes líneas en la salida (*demultiplexación*).

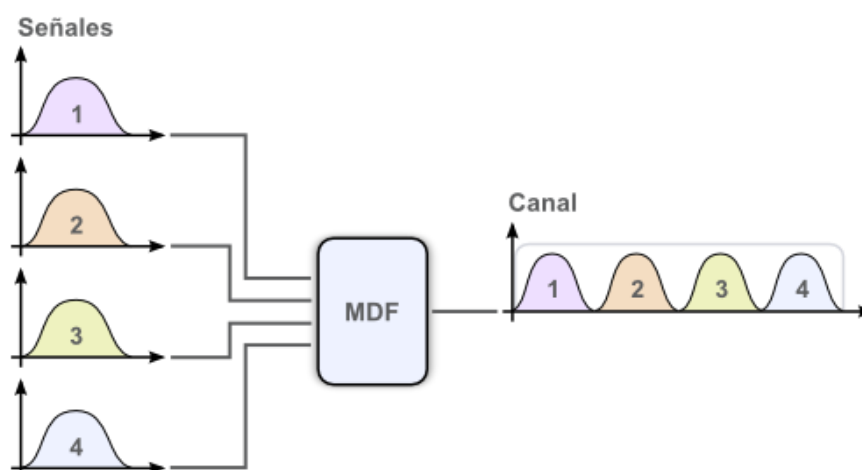
Un aspecto importante que se debe tener claro a partir de ahora es que cuando se haga referencia a “*enlace*”, se está haciendo referencia al camino físico por el que se transmiten los datos, mientras que cuando se hable de “*canal*” se está refiriendo a la porción de un enlace que transporta una comunicación entre un par concreto de líneas. Por tanto, un enlace puede estar formado por muchos canales.

Existen dos técnicas básicas de multiplexación, **multiplexación por división en frecuencia** y **multiplexación por división en el tiempo**, si bien existen otras técnicas las cuales se pueden encuadrar dentro de las anteriores: **multiplexación por división de longitud de onda** como un caso particular de la primera, y **multiplexación estadística** como un caso particular de la segunda.

Multiplexación por división en frecuencia

Esta técnica de multiplexación, también conocida como FDM (*Frequency-Division Multiplexing*) fue diseñada para transmitir señales analógicas, y se puede aplicar siempre que el ancho de banda útil del enlace sea mayor que los anchos de banda combinados de las señales a transmitir.

Las señales que se desean transmitir, generadas por diferentes dispositivos fuente, ocupan el mismo espectro de frecuencias. El multiplexor modula (utilizando FSK) dichas señales utilizando distintas frecuencias portadoras, las cuales se combinan a continuación en una única señal compuesta que será la que se transmita por el enlace. A cada señal modulada se le asigna un subconjunto de frecuencias del enlace de datos, dando lugar a lo que se conoce como **canal**. Estos canales, para evitar que se solapen unos con otros, se separan con porciones de ancho de banda sin utilizar, llamadas **bandas de guarda**. En la figura siguiente se ilustra el funcionamiento de este tipo de multiplexación, así como la separación en frecuencias creando los canales y la separación existente entre ellos o bandas de guardia.



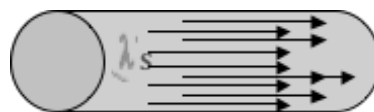
Una vez la señal multiplexada alcanza el extremo donde se debe demultiplexar, el multiplexor utiliza una serie de filtros que permiten descomponer dicha señal en las diferentes señales que

la forman, para a continuación demodularlas y separarlas así de sus portadoras, obteniendo las señales originales, las cuales se redirigen hacia sus líneas de salida.

La aplicación más típica de la FDM se da en la radio y en la televisión, donde el aire se utiliza como medio de transmisión o enlace. En la radio, tanto en AM como en FM, la señal de audio de cada estación debe modularse, bien por amplitud o bien por frecuencia, para obtener las distintas frecuencias de portadoras, independientes unas de las otras, las cuales podremos sintonizar posteriormente desde nuestro equipo de radio.

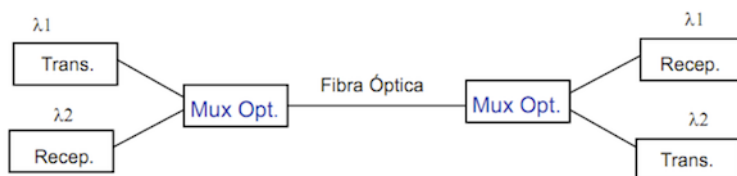
Multiplexación por división de longitud de onda

Existe una variante de la multiplexación por división de frecuencia pensada para aprovechar la gran capacidad ofrecida por los enlaces de fibra óptica. Esta variante, conocida como **multiplexación por división de longitud de onda** (o WDM, *Wavelength Division Multiplexing*), permite transmitir diferentes señales ópticas sobre una misma fibra óptica empleando varias portadoras con diferentes longitudes de onda (y, por tanto, diferentes frecuencias). En esta técnica, los multiplexores son *multi-plexores ópticos*.



Puesto que las frecuencias de las señales que viajan a través de una fibra son distintas, también lo son sus longitudes de onda (*lambda*). De hecho, en WDM se denomina *lambda* a cada una de las señales que se transmiten por una fibra, llegando a incluso a alquilar *lambdas* en enlaces ópticos.

Conceptualmente, FDM y WDM son iguales a excepción de que ésta última involucra señales ópticas transmitidas a través de fibra óptica.

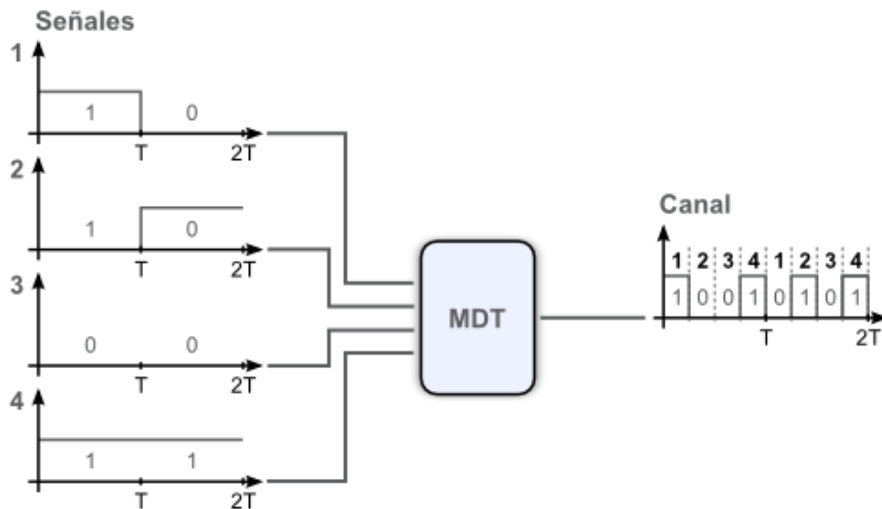


Además de la WDM normal, existe la técnica **DWDM (WDM Denso)** la cual consigue una mayor eficiencia del enlace de fibra que la anterior, en base a que las señales ópticas que se introducen por la fibra, también denominadas *lambdas*, se encuentran más cerca unas de otras. Se considera que un sistema WDM es denso cuando la separación entre las longitudes de onda es menor a 2 nm.

Multiplexación por división en el tiempo

Existe un segundo tipo de técnica de multiplexación llamada **multiplexación por división en el tiempo** (o TDM, *Time-Division Multiplexing*) donde diferentes conexiones con señales digitales pueden compartir un mismo enlace, pero en esta ocasión aprovechando todo el ancho de banda disponible y no sólo una parte del mismo como en FDM. Para ello, esta técnica comparte el enlace asignando un intervalo de tiempo en el que cada conexión puede utilizarlo.

El tiempo asignado para que cada línea de entrada transmita su información (un bit, un carácter, o un bloque de datos) se denomina **canal**.



La figura anterior ilustra el funcionamiento de esta técnica de multiplexación. Suponiendo que las líneas de entrada (A, B y C) tienen todas la misma velocidad de transmisión, el multiplexor obtiene una muestra del flujo de datos de cada una de las líneas durante un periodo de tiempo (T), con el objetivo de encapsular la información a transmitir en lo que se conoce como **trama**. Por tanto, las tramas, que conforman las unidades de información que se van a enviar por el enlace, están formadas por tantos canales como líneas de entrada haya, estando las posiciones de estos canales prefijadas de antemano.

Como el multiplexor obtiene datos cada T segundos, debe encapsularlos en la trama y enviar esta última por el enlace en ese mismo periodo de tiempo T . De esta forma, el multiplexor es capaz de transmitir una trama antes de recibir los datos necesarios para procesar la siguiente. Por tanto, la duración de transmisión de cada trama es T , lo que implica que los canales van a tener una duración de transmisión de T/n segundos, siendo n el número de líneas de entrada.

Dicho de otra forma, para garantizar la transmisión de los datos, el régimen binario (*bps*) en el enlace debe ser n veces mayor o igual que el existente en la línea de entrada. Es decir, si como ocurre en el ejemplo, hay tres líneas de entrada, el régimen binario del enlace debe ser tres veces más rápido que el de cada línea de entrada.

En el caso de tener señales analógicas en la entrada, TDM permite combinarlas basándose en que para transmitir una señal es suficiente con muestrearla y transmitir las muestras tomadas a una velocidad igual o superior al doble de su ancho de banda (realizado por el códec), como se hace en MIC. Para ello, el multiplexor irá obteniendo una muestra de cada una de las señales de las líneas de entrada y generará con ellas una trama, la cual enviará a través del enlace. De esta forma, se puede definir también la trama como el tiempo que transcurre entre dos muestras consecutivas de la señal de una misma línea de entrada.

Este tipo de TDM se conoce como *TDM Síncrona* y funciona muy bien, utilizándose sobre todo en compañías de telefonía móvil de segunda generación. Sin embargo, tiene la pega de que no es todo lo eficiente que podría ser, y ya se sabe que es primordial que el ancho de banda se

comparta de forma eficiente. El problema aparece porque en la realidad, no todos los emisores permanecen continuamente transmitiendo, y al no tener datos que enviar, el canal correspondiente a la trama que se transmite estará vacío. Para ayudar en la resolución de este problema aparece la **multiplexación estadística** por división del tiempo o simplemente TDM estadística.

Multiplexación estadística

En la TDM estadística, los canales se asignan en las tramas de forma dinámica en vez de estar fijas, asignadas una a cada línea de entrada. El multiplexor va sondeando cada una de las líneas de entrada y, únicamente en los casos en los que dicha línea tenga información que transmitir, asigna un canal en la trama correspondiente. De esta forma, se consigue optimizar el ancho de banda del enlace al no dejar canales libres dentro de la trama, o lo que es lo mismo, sólo se transmiten los datos de aquellas líneas de entrada que, en cada instante, tengan datos que transmitir.

Sin embargo, este esquema estadístico implica que los canales ya no están asociados a una línea concreta, sino que pueden llevar unidades de datos de cualquiera de ellas. Resulta necesario entonces enviar información de direccionamiento por cada canal de modo que el demultiplexor sepa identificar la dirección de la línea de salida a la que tiene que redirigir los datos enviados. En esta ocasión, por tanto, el tamaño de la trama no es siempre igual a la suma de las líneas de entrada.

En la multiplexación estadística el enlace de transmisión puede tener menor ancho de banda que la suma de los anchos de banda de las líneas de entrada.

Espectro Expandido

En los apartados anteriores se han explicado diversas técnicas que permiten aprovechar adecuadamente un ancho de banda dado, multiplexando comunicaciones en un mismo enlace de forma que su ancho de banda se comparta entre varios emisores. Con las técnicas de multiplexación se logra comunicar dos sistemas sin necesidad de tener un enlace dedicado en exclusiva a dicha comunicación, aprovechando al máximo el ancho de banda de dicho enlace.

No obstante, hay determinados tipos de transmisiones donde la prioridad se centra en aspectos como la seguridad y la fiabilidad de la comunicación, por encima de la idea de optimizar el uso del ancho de banda. Un ejemplo claro de ello son las comunicaciones inalámbricas, cada vez más utilizadas hoy en día. Los datos, ya sean personales o empresariales, viajan usando como medio de transmisión el aire y cualquier sistema puede tener acceso físico a los mismos. Por tanto, se hace imprescindible:

- Minimizar las interferencias sufridas por ruido casual o provocado por emisores malintencionados
- Evitar la interceptación de nuestros datos por parte de usuarios intermedios
- Mejorar la recepción de la información por parte del receptor, aunque existan varios usuarios independientes emitiendo a la vez

Si no se logran cumplir estos requisitos, las soluciones inalámbricas no tendrían validez en el ámbito de las comunicaciones, y precisamente para dar respuesta a esos problemas surge la

técnica de Espectro Expandido, ideada para un ámbito militar donde se pretendía cifrar las transmisiones para que no pudieran ser interferidas ni interceptadas por el bando enemigo.

El espectro expandido persigue conseguir que una comunicación sea **resistente a las interferencias externas** y a la **intercepción**. Para ello, va a ser necesario emplear un ancho de banda mayor que el que exige realmente la comunicación en sí, con lo que se va a perder ancho de banda en favor de aumentar la seguridad/fiabilidad de la transmisión. Es como si se envía un objeto muy delicado por mensajería: tenemos la opción de meterlo en un envoltorio que se ajuste al tamaño, ahorrando dinero en el envío, o bien, de envolverlo cuidadosamente en corcho, plástico contra golpes, caídas, etc., con lo que tendremos que enviar un paquete mucho mayor (nos supondrá mayor coste) pero más seguro.

Nos encontramos, por tanto, ante una problemática distinta a la que trataba de resolver la multiplexación, donde se pretende optimizar el ancho de banda de cada comunicación a fin de poder entremezclar varias transmisiones y aprovechar al máximo el canal utilizado.

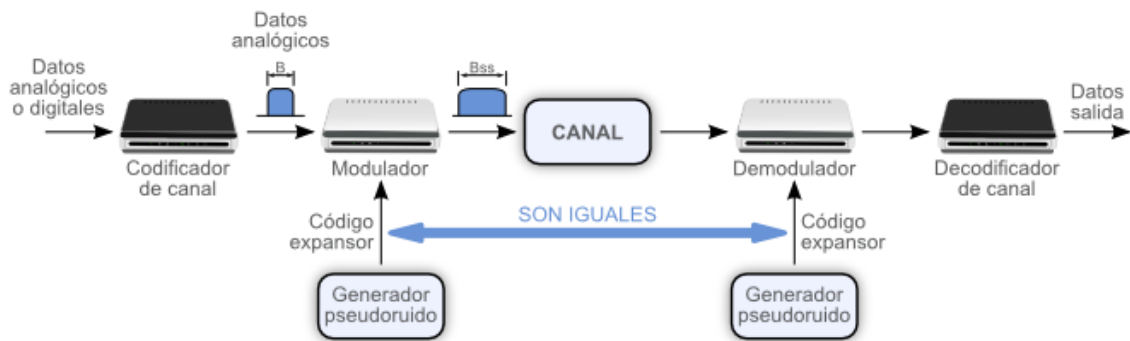
Si la estación emisora requiere un ancho de banda B para llevar a cabo el envío de datos, la técnica de espectro expandido va a utilizar un ancho de banda B_{ss} cumpliéndose que $B_{ss} \gg B$. Además, la expansión deliberada del ancho de banda se realiza mediante algún mecanismo conocido tanto por el emisor como por el receptor. Con este desaprovechamiento de ancho de banda se logrará, como se explica a continuación:

- Inmunidad ante interferencias.
- Ocultar/cifrar la señal ante intrusos.
- Permitir que usuarios independientes usen el mismo ancho de banda y el mismo medio (el aire) sin interferir unos con otros. Se combinan señales de varias fuentes, como en la multiplexación, pero el objetivo fundamental es que múltiples emisores utilicen simultáneamente el mismo ancho de banda sin necesidad de coordinarse entre ellos.

Existen hoy día dos tipos de técnicas de espectro expandido que cumplen con los objetivos y los requisitos descritos anteriormente:

- La técnica de espectro expandido por **salto en frecuencias** transmite una señal sobre una serie aparentemente aleatoria de frecuencias portadoras distintas, saltando de una frecuencia a otra en intervalos fijos de tiempo. Estos saltos de una frecuencia a otra permiten perder el rastro de intrusos que escuchen o interfieran por una frecuencia constante.
- La técnica de espectro expandido por **secuencia directa** es una variante más moderna en la que cada bit de la señal original se representa con un código de varios bits en la señal transmitida. Esto impide que los intrusos puedan descifrar la señal original y minimiza los efectos de interferencias casuales o intencionadas.

Ambas técnicas de espectro expandido permiten transmitir datos analógicos o digitales, haciendo uso de una señal analógica, según el esquema mostrado a continuación.



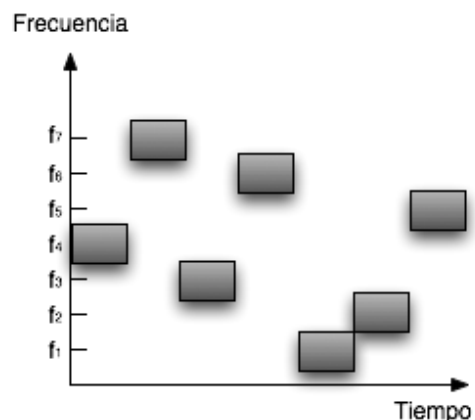
La señal de espectro expandido, una vez expandida, puede coexistir con otras comunicaciones en un mismo enlace, ya que éstas sólo implican un pequeño incremento en el ruido. En lo que se refiere al receptor de espectro expandido, el sistema no percibe el resto de señales, siguiendo el mismo esquema que usó el modulador para demodular la señal de origen que le interesa.

La técnica de espectro expandido se emplea actualmente en todo tipo de transmisiones inalámbricas (telefonía, Bluetooth, Wifi, etc.), en numerosas aplicaciones militares y en comunicaciones GPS.

Espectro expandido por salto de frecuencias

La primera técnica de espectro expandido que surgió fue la **expansión por salto de frecuencias**. Con la idea de lograr que una transmisión sea más fiable y segura, y pueda ser resistente a las transferencias y las intercepciones, esta técnica pretende evitar que toda la comunicación se realice en una única frecuencia de transmisión analógica concreta. Si un intruso detectase la frecuencia exacta a través de la cual el emisor se comunica con el receptor, podría interceptar fácilmente los datos enviados, o simplemente producir ruido en dicha frecuencia y arruinar la transmisión.

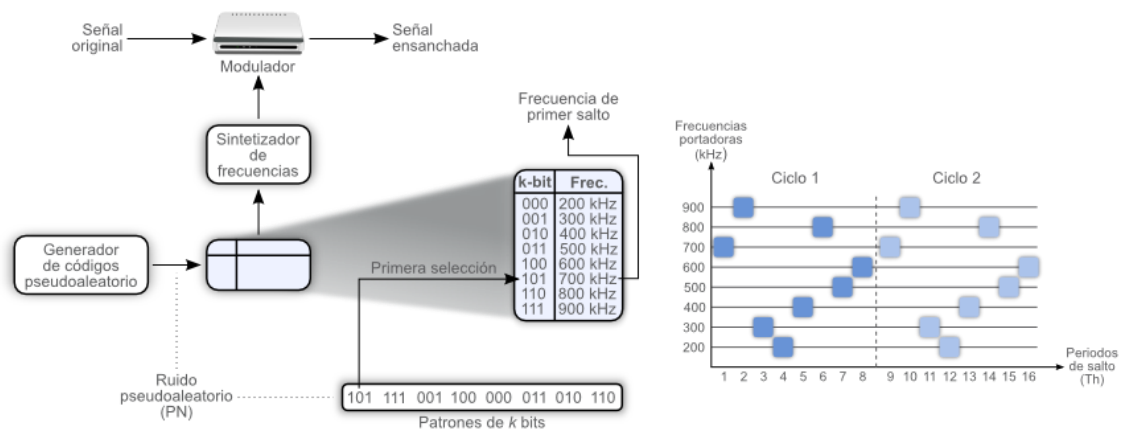
Por ello, esta técnica se basa en emplear M frecuencias portadoras distintas entre ellas, y en cada instante de la comunicación, ir cambiando la transmisión de una frecuencia portadora a otra, para evitar que un intruso pueda seguirnos el rastro entre salto y salto. Como se puede ver en la figura de la derecha, el emisor va a emplear una frecuencia distinta en cada intervalo de tiempo: en el intervalo 1 empleará la frecuencia 5, en el intervalo 2 la frecuencia 8, y así sucesivamente. Dado que se van a emplear 8 frecuencias portadoras distintas, a partir del intervalo de tiempo 9 se volverá a emplear la frecuencia 5 y se repetirá el ciclo de saltos por frecuencias.



El ancho de banda del medio de transmisión empleado al usar esta técnica va a ser mucho mayor que el ancho de banda normalmente requerido para transmitir dicha señal. Imaginemos que el emisor puede transmitir en una frecuencia de 100 kHz, y sin embargo, se va a usar un rango de frecuencias de 200 a 900 kHz para permitir que el emisor transmita sobre una serie de radiofrecuencias aparentemente aleatoria. Se cumple que $B_{ss} = \text{de } 200 \text{ a } 900 \text{ kHz} \gg B = 100$

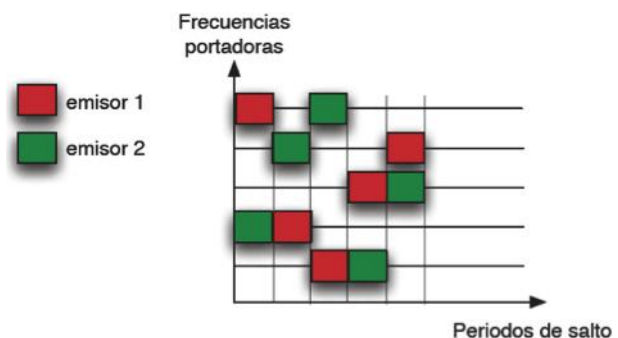
kHz, es decir, se “desaprovecha” ancho de banda a favor de aumentar la seguridad y fiabilidad de la transmisión. El receptor captará el mensaje saltando de frecuencia en frecuencia transmisora ya que comparte la secuencia de saltos con el emisor, y sabe en qué frecuencia escuchar en cada momento. Todos los receptores no autorizados escucharán una señal ininteligible, ya que sólo conseguirían unos pocos bits de la comunicación, pero no saben dónde buscar el resto. Además, si el intruso emitiera un ruido por una frecuencia dada (por ejemplo 700 kHz), ese ruido solo afecta a un conjunto pequeño de datos de la transmisión, sin interferir en el resto.

Una vez entendida la técnica de salto de frecuencias, es necesario aprender cómo el emisor y el receptor de los datos se ponen de acuerdo en cuanto a cuál es la frecuencia portadora por la que se emite en cada momento y cuál va a ser la secuencia de saltos entre distintas frecuencias. El esquema seguido en el emisor (análogo al que se sigue en el receptor) es el siguiente:



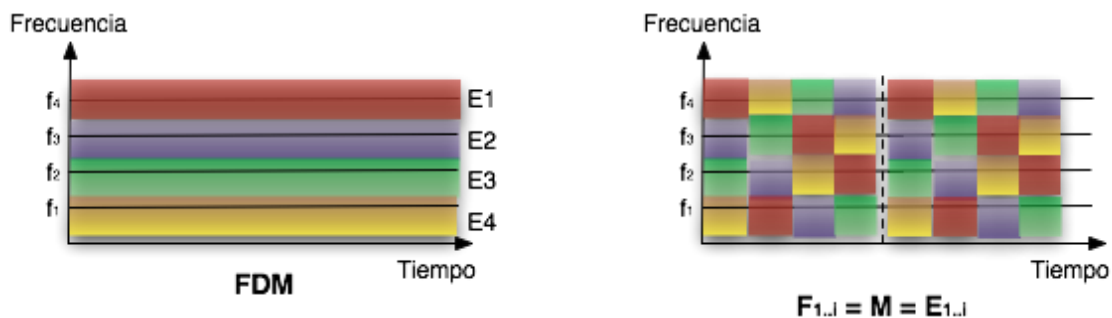
Emisor y receptor comparten un mismo ruido pseudoaleatorio en forma de patrón de k bits, donde $2^k = M$. En el ejemplo se muestra que $M = 8$, es decir, se van a emplear 8 frecuencias portadoras. Por tanto, se generan patrones de $k = 3$ bits, dado que $2^3 = 8$. En ese patrón aparecen M secuencias de esos k bits, ordenadas aleatoriamente, es decir, el código es una permutación concreta de las 8 posibilidades de ordenar 3 bits. Con ese patrón se va a hacer uso de una tabla como la mostrada en la figura. Cada conjunto de 3 bits sirve para acceder a una fila de la tabla y obtener la frecuencia por la que emitir (y por la que escuchará el receptor). En el siguiente intervalo, se avanza en el patrón al siguiente bloque de 3 bits, y así sucesivamente hasta acabar el patrón. Una vez acabado, se vuelve a su inicio de forma secuencial. Por tanto, emisor y receptor deben compartir la tabla de frecuencias y el patrón a usar.

Finalmente, cabe destacar que el desaprovechamiento del ancho de banda que provoca esta técnica es muy amplio cuando una sola estación se encuentra emitiendo datos. Sin embargo, si existen más estaciones emisoras, es posible multiplexar sus comunicaciones con saltos por frecuencias que no emitan por la



misma frecuencia portadora en el mismo intervalo de tiempo. En la siguiente figura, se muestra un ejemplo en el que dos estaciones saltan por las mismas frecuencias sin colisionar la una con la otra.

Usando este principio, si hay M frecuencias de salto se pueden llegar a multiplexar M estaciones emisoras, usando una modulación coordinada entre ellas. De hecho, empleando esta multiplexación es fácil comprobar que los saltos de frecuencias de las M estaciones emisoras por M frecuencias portadoras ofrecen resultados similares a una multiplexación FDM (multiplexación por división de frecuencias), pero añadiendo seguridad ante intrusos.



Espectro expandido por secuencia directa

El **espectro expandido por secuencia directa** es una técnica más moderna que el espectro expandido por salto de frecuencias. En ella se expande el ancho de banda de la siguiente forma: cada bit de información se sustituye por n bits, que en esta técnica se van a denominar chips. Cabe destacar que la tasa de transmisión de estos chips es n veces la tasa de envío de los bits originales.

El emisor y el receptor de la transmisión compartirán un código de expansión que permitirá transformar cada 1 ó 0 de información en un conjunto de n chips, y a su vez revertir la traducción para obtener los datos originales.

Esta técnica es muy usada en conexiones inalámbricas de área local (WiFi), donde se usa una secuencia Barker, que establece que el número n de chips es igual a 11, y el código emplea una codificación polar de tipo NRZ. De esta forma, es habitual que cada bit se expanda a 11 chips, lo que supone una expansión del ancho de banda considerable. El esquema empleado en dicha expansión es el siguiente:

En este ejemplo, la tasa de la señal original es N , la tasa de la señal nueva es $11/N$ y por tanto, B_{ss} es 11 veces mayor que el ancho de banda B requerido por la comunicación original.

A continuación se muestra un ejemplo simplificado donde el número de chips es 6, y se pretenden transferir 3 bits de datos:

- Código: 1, -1, -1, 1, -1, 1
- Datos: 1 0 1 (3 bits)
- Transmisión 1,-1,-1,1,-1,1 -1,1,1,-1,1,-1 1,-1,-1,1,-1,1 (18 chips)

Como puede comprobarse en la transmisión, la señal ensanchada contiene la señal NRZ por cada 1 encontrado en los datos y la señal invertida por cada 0.

El receptor decodifica la transmisión calculando el resultado de multiplicar los valores recibidos por el código del emisor (bit a bit) y sumando los resultados (producto **escalar**)

- Transmisión 1,-1,-1,1,-1,1 -1,1,1,-1,1,-1
- Código: 1,-1,-1,1,-1,1 1,-1,-1,1,-1,1
- Resultado: 1+1+1+1+1+1 -1-1-1-1-1-1
- Si el resultado es 6 se ha transmitido un 1, si es -6 se ha transmitido un 0

Las implicaciones de usar esta técnica son simples: se desaprovecha el ancho de banda, pero si un intruso desconoce el código expensor, no va a ser capaz de interpretar la señal transmitida. Si además, ese intruso introduce ruido en la transmisión, el receptor tal vez no reciba un 6 por cada uno, pero hallará un 4 o 5 como resultado del producto escalar. Esos valores distan mucho del resultado -6, con lo que entenderá el valor como un 1 igualmente.

Ahora bien, ¿es posible multiplexar las emisiones de varias estaciones que empleen esta técnica para minimizar así la pérdida de ancho de banda y evitar a su vez que interfieran entre ellas? Este escenario es similar a cuando varias personas se juntan en un mismo recinto y hablan unos con otros todos a la vez. En estos casos, solo el hecho de que los distintos interlocutores hablen distintos idiomas permite que cada persona se centre sin interferencias en recibir aquello que su emisor le está comunicando.

En el caso de las transmisiones de espectro expandido, es igualmente necesario que cada pareja emisor-receptor utilice un código de comunicación propio y distinto al del resto de emisores-receptores. Para ello es necesario emplear códigos expansores específicos para cada emisor, utilizando una técnica que se denomina **acceso múltiple por división de código** (CDMA, del inglés *Code Division Multiple Access*). Esta técnica emplea, en la medida de lo posible, códigos ortogonales que permiten que cada estación receptora sólo pueda oír al emisor deseado.

Imaginemos una estación emisora A cuyo código expensor es $C_A = 1, -1, -1, 1, -1, 1$, y una estación B cuyo código expensor es $C_B = 1, 1, -1, -1, 1, 1$.

Supongamos que B envía un 1. Los datos enviados serán **1, 1, -1, -1, 1, 1**. Imaginemos que el receptor de la transmisión de A recibe estos datos (es decir, que B interfiere en la transmisión que el receptor está manteniendo con A). Al aplicar el código expensor de C_A a esos datos se obtiene:

$$1 \times 1 + 1 \times (-1) + (-1) \times (-1) + (-1) \times 1 + 1 \times (-1) + 1 \times 1 = 0$$

Es decir, la señal no deseada de B no puede ser comprendida por el receptor de A gracias al código de A. Igualmente ocurre si B transmitiera un 0 en lugar de un 1. Esto es porque C_A y C_B son ortogonales.

Imaginemos ahora una estación emisora C cuyo código expensor es $C_C = 1, 1, -1, 1, 1, -1$. Esa estación C emite un 1, comprobemos ahora cual es el resultado que le llega a la estación receptora de la comunicación A:

$$1 \times 1 + 1 \times (-1) + (-1) \times (-1) + 1 \times 1 + 1 \times (-1) + (-1) \times 1 = 0$$

Es decir, la estación receptora A no puede recibir la transmisión de C, aunque sí la de la estación emisora A a la que escucha.

Por último se va a comprobar qué detectaría la estación receptora B, con su código concreto C_B , ante la emisión de un 1 por parte de la emisora C:

$$1 \times 1 + 1 \times 1 + (-1) \times (-1) + 1 \times (-1) + 1 \times 1 + (-1) \times 1 = 2$$

En este caso, la emisora que está escuchando a B recibe un 2 por culpa de una interferencia de la emisora C. No obstante, 2 es muy similar a 0 y difiere mucho de un 6, por lo que el receptor de B puede “ignorar” esta interferencia de C. Esto es debido a que C_C y C_B no son exactamente ortogonales, debido a que las secuencias de expansión que cumplen estas propiedades entre sí son escasas.

No obstante, estos códigos expansores con cierta ortogonalidad permiten que varios emisores emitan sin interferir entre ellos y sin la necesidad de haberse puesto previamente de acuerdo entre sí. El uso de estos códigos recibe el nombre de acceso múltiple por división de código, y es una forma de lograr que varios emisores que empleen expansión de espectro por secuencia directa puedan multiplexar sus comunicaciones a través del mismo medio.

Sistemas de Transmisión

Las redes telefónicas supusieron un reto tecnológico a nivel de sistemas de transmisión que permitieran llevar a cabo las comunicaciones necesarias en el ámbito WAN. Los medios de transmisión tienen una capacidad limitada, la red física se encuentra ya establecida y es muy caro ampliarla. Por ello, ante la creciente demanda de capacidad los enlaces entre las centrales llevan multiplexadas comunicaciones de muchos clientes en el mismo medio.

Esta transmisión paralela exige modulación y multiplexación de la señal. En la actualidad se están actualizando gradualmente los medios físicos, y la llegada de la fibra óptica aumenta considerablemente las posibilidades de comunicación.

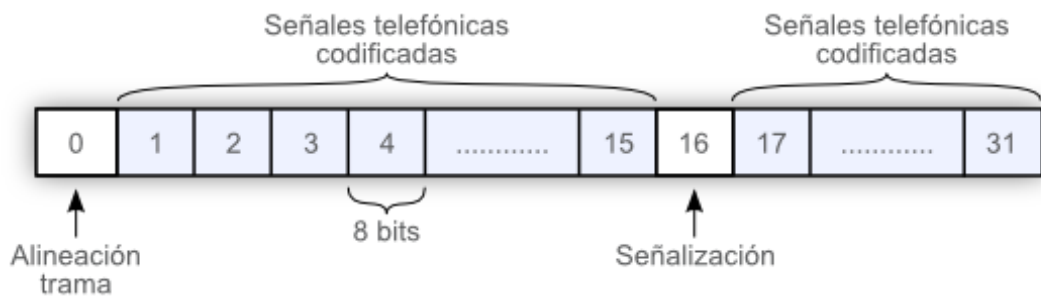
En este apartado se estudian dos mecanismos básicos de multiplexación que se emplean en par trenzado y en transmisiones sobre fibra óptica.

Jerarquía MIC

La Jerarquía MIC, también denominada Jerarquía Digital Pleisócrona, sirve para multiplexar múltiples comunicaciones de 64 kbps empleando ranuras de 8 bits por canal. Esta jerarquía se diseñó para las redes de telefonía, y su estructura refleja la codificación MIC de las conexiones de voz.

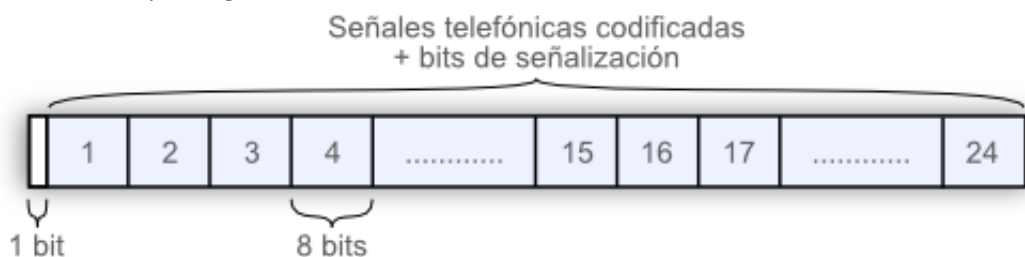
Existen dos estándares o perspectivas:

- MIC europeo. En nivel básico se denomina E1 y transmite 30 comunicaciones de voz, codificadas a una velocidad de 8000 muestras por segundo y utilizando 8 bits por muestra. Se envían 8000 muestras por segundo, por lo que la trama mostrada a continuación se transmite en 1/8000 segundos.



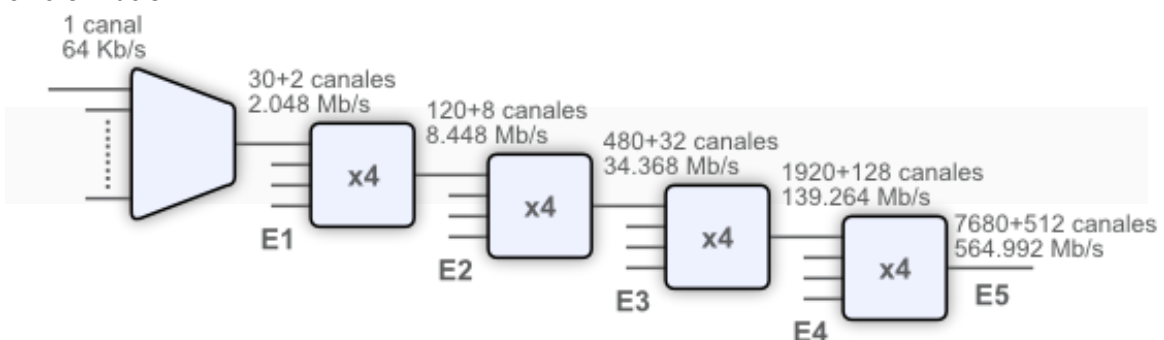
- Bits por canal = 8 bits
- Nº de canales telefónicos multiplexados TDM = 30 (Rec.G.711, 8 bits/muestra)
- Nº de canales de sincronización y señalización = 2
- Nº Bits por trama = 256 (8x32)
- Velocidad de Transmisión = 2,048 Mbps

- MIC Americano. El nivel básico se denomina T1 y multiplexa 24 canales de comunicación, que transportan 7 bits de voz y uno de señalización, a una velocidad de 8000 muestras por segundo.



- Bits por canal = 8 bits (7 bits de voz y un bit de señalización)
- Nº de canales telefónicos multiplexados TDM = 24 (Rec.G.7 bits/muestra)
- Bits de señalización incluidos en cada canal
- Nº Bits por trama = 193 (24x8+1)
- Velocidad de Transmisión = 1,544 Mbps

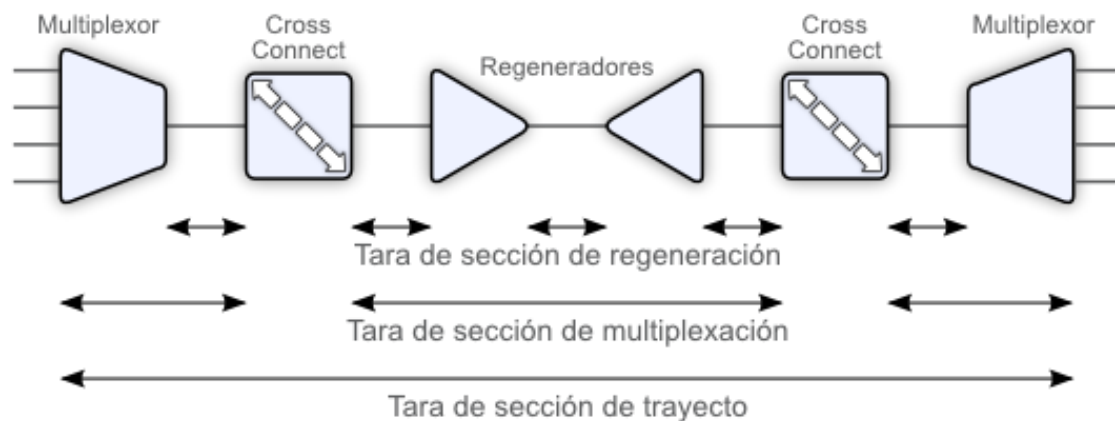
La jerarquía MIC agrupa las conexiones de 4 en 4. Así, 4 conexiones E1 se agrupan en una conexión E2 que transporta 120 canales de voz y 8 de señalización. En la siguiente figura se muestra la jerarquía MIC europea. Las velocidades incluyen una sobrecarga por gestión y sincronización.



La jerarquía MIC presenta dificultades a la hora de acceder a una de las señales transmitidas, por ejemplo para comprobar su funcionamiento, puesto que obliga a demultiplexar toda la jerarquía para ello.

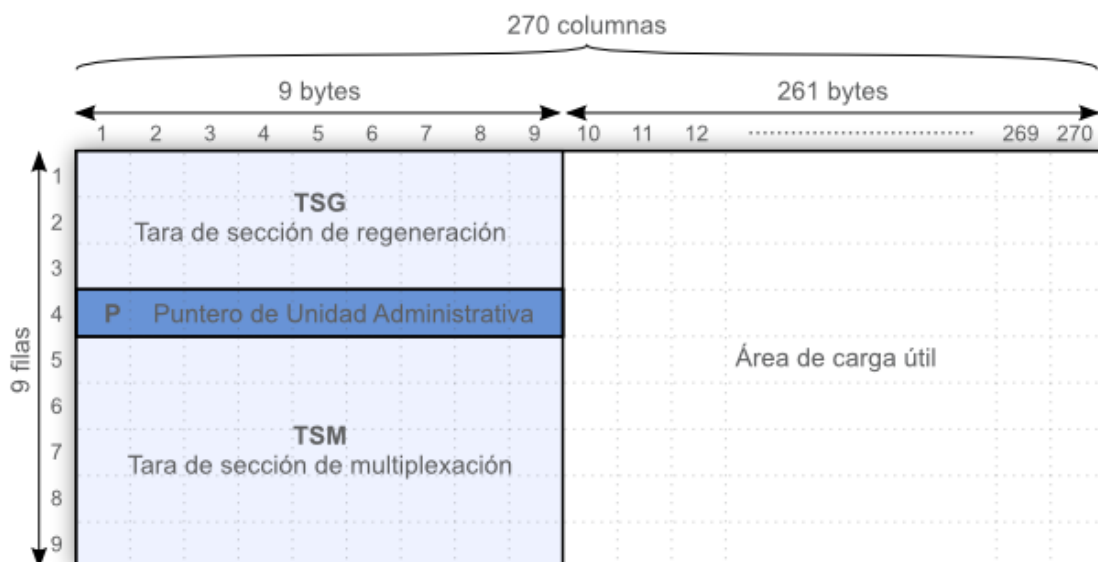
Jerarquía Digital Síncrona

Con el objetivo de evitar el problema de la jerarquía MIC a la hora de acceder a transmisiones individuales y de ofrecer mayores velocidades de transmisión se creó la Jerarquía Digital Síncrona. Esta jerarquía, a parte de las mejoras de capacidad y acceso a las señales, facilita la gestión y el mantenimiento, permitiendo establecer a su vez comunicaciones entre los diferentes dispositivos que crean una red JDS



Estructura de la trama básica

La trama básica de la JDS se denomina *Módulo de Transporte Síncrono* de nivel 1 STM-1, tiene una longitud de 2.430 octetos y una duración de 125 microsegundos, es decir la velocidad de trama es de 8.000 tramas por segundo. Por tanto cada octeto de la misma tendrá una velocidad de 64 kbit/s y podrá transportar una conversación telefónica.



Cada celda de la matriz de 270 columnas x 9 filas es un octeto que permite una comunicación de voz.

Las 9 primeras columnas forman la cabecera de control y llevan los canales de supervisión y servicio que supone 5,184 *Mbit/s*. Aparece además un puntero con información de cada comunicación que es precisamente el que evita que tengamos que multiplexar.

Para señal de datos (carga del módulo *MTS-1*) quedan 261 x 9 octetos x 8 bits/octeto x 8.000 trams/seg = 150,336 *Mbit/seg*. Como se puede comprobar es suficiente para transportar una señal de orden 4º de la *JDP* (139,264 *Mbit/seg*.). La carga puede ir flotando sobre la zona de datos sin verse obligada a comenzar siempre en la primera posición, ya que el puntero localizado en la fila 4ª de la cabecera indicara la posición exacta donde comienza la señal de datos.

En JDS se pueden transmitir una o varias señales de la *JDP*, lo que se realiza encapsulando las tramas de dichas conexiones en contenedores (C). Se han definido contenedores para todas las señales tributarias, por ejemplo el Contenedor C-4 identifica la señal de orden 4 de la *JDP*. En la tabla siguiente se muestran los contenedores definidos para señales tributarias de la *JDP*.

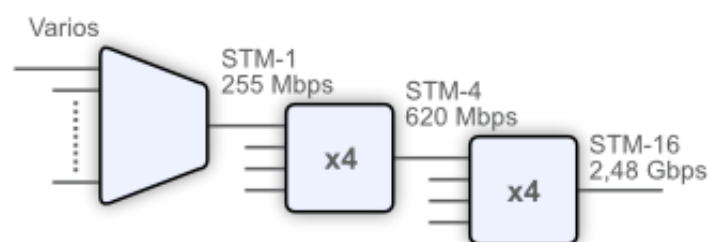
Contenedor	JDP Europea	JDP Americana
C-11		1,544 Mbps
C-12	2,048 Mbps	
C-2		6,312 Mbps
C-3	34,364 Mbps	
C-4	139,264 Mbps	

Para transportar un Contenedor en una trama *STM* se le añade la tara de trayecto y a la señal resultante se le denomina *Contenedor Virtual*, *CV*.

Elementos necesarios en la jerarquía

Para establecer la jerarquía JDS es necesario un multiplexor que es el que crea las cabeceras, conectividad entre elementos y regeneradores para recuperar bits a nivel físico que se pierden al transmitir datos digitales por medio físico.

La mutliplexación lograda es la siguiente:



El problema de este sistema es que la multiplexación es a nivel de byte, lo que la complica dado el entrelazado de información.

Técnicas de transmisión de datos digitales

La transmisión de una cadena de bits desde un dispositivo a otro a través de una línea de transmisión implica un alto grado de cooperación entre ambos extremos. Uno de los requisitos esenciales es la *sincronización*: el receptor debe saber la *velocidad* a la que se van a recibir los datos de tal manera que pueda muestrear la línea a intervalos constantes de tiempo para así determinar cada uno de los bits recibidos.

La **sincronización** consiste en permitir que los tiempos de funcionamiento de dos sistemas distintos lleven el mismo ritmo, de forma que puedan realizar tareas complementarias de manera coordinada y simultánea.

Se denomina, por tanto, sincronización al proceso mediante el cual un emisor informa a un dispositivo receptor sobre en qué momento se van a transmitir las correspondientes señales. En éste proceso de sincronización se pueden distinguir tres niveles:

- Sincronización a *nivel de bit*: Debe reconocerse el comienzo y el fin de cada bit.
- Sincronización a *nivel de carácter o palabra*: Debe reconocerse el comienzo y el final de cada unidad de información, como puede ser un carácter o una palabra transmitida.
- Sincronización a *nivel de bloque o mensaje*: Debe reconocerse el comienzo y el final de cada bloque de datos (conjunto de palabras o caracteres).

En general, los diferentes tipos de sincronización pueden conseguirse de dos maneras diferentes: mediante técnicas de **transmisión síncrona** o **asíncrona**.

Del mismo modo, además de la coordinación en la velocidad de transmisión, es posible llegar a niveles más altos de cooperación de forma que la transmisión pueda recuperarse de pérdidas de información o de corrupción en los datos en la misma. Para ello, se emplearán técnicas de detección y corrección de errores que conllevarán generalmente reenvíos de datos perdidos o extraviados.

Transmisión asíncrona

Una forma de coordinar al emisor y al receptor durante la transmisión de datos es utilizar la denominada **transmisión asíncrona**, en la que cada carácter se envía de forma independiente al resto. Al inicio de un nuevo carácter se añade al menos un bit de comienzo. Éste alerta al receptor del inicio de ese nuevo carácter.

La **transmisión asíncrona** se da lugar cuando el proceso de sincronización entre emisor y receptor se realiza en cada palabra de código transmitido. Esta sincronización se lleva a cabo a través de unos bits especiales que definen el entorno de cada código.

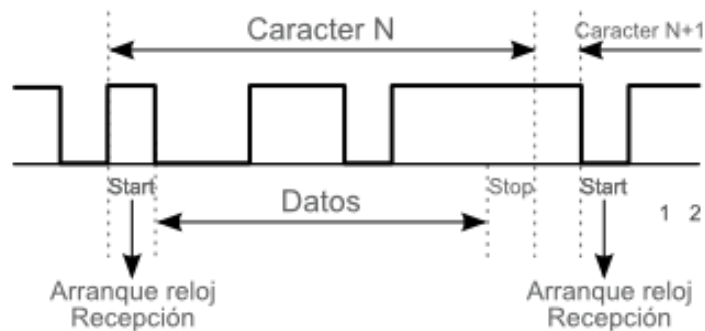
En este tipo de transmisión, el receptor no sabe con precisión cuando recibirá un carácter (y de aquí su denominación de asíncrona). Cada carácter transmitido está delimitado por al menos un bit de información, denominado "*de cabecera*" o "*de arranque*", y al menos otro bit denominado "*de terminación*" o "*de parada*".

El bit de arranque tiene las funciones de sincronización de reloj, al identificar el inicio del carácter en el origen y en el destino, mientras que el bit de parada se usa para indicar que ha finalizado carácter.

Partiendo desde la línea de transmisión en reposo (cuando tiene el nivel lógico 1), el emisor informa al receptor de que va a llegar un carácter. Para ello, antepone al menos un bit de arranque (*Start*) con el valor lógico 0. Una vez que el bit *Start* llega al receptor, este disparará un reloj interno y se quedará esperando por los sucesivos bits que contendrá la información del carácter transmitido por el emisor.

Una vez que el receptor recibe todos los bits de información, se añadirá al menos un bit de parada (*Stop*) de nivel lógico 1, que repondrá en su estado inicial a la línea de datos, dejándola así preparada para la transmisión del siguiente carácter.

Este tipo de transmisión se utiliza con velocidades de modulación relativamente bajas (típicamente velocidades del orden de kilobits). Si se calcula el rendimiento para una transmisión que se basa en el uso de un bit de arranque y dos de parada, en una señal que use código de 7 bits más uno de paridad se transmitirán 7 bits de datos reales sobre 11 transmitidos totales, lo que supone el 64% de datos reales en la transmisión total.



Las **ventajas y desventajas** de este modo asíncrono son las siguientes:

- En caso de la existencia de errores, siempre se produce la **pérdida** de una cantidad pequeña de caracteres, pues éstos se sincronizan y se transmiten de uno en uno.
- Se da un **bajo rendimiento de transmisión**, dada la proporción de bits útiles y de bits de sincronismo que hay que transmitir por cada carácter.
- Son especialmente **aptos** cuando no se necesitan lograr altas velocidades.

Transmisión síncrona

La técnica de transmisión **síncrona** permite que el origen y destino colaboren adecuadamente durante transmisiones de bloques de información largos, en los que la técnica asíncrona presenta carencias. En la técnica síncrona se forma una trama con cada bloque de datos, que incluirá, entre otros campos, los delimitadores de principio y de fin. Adicionalmente, las tramas podrán emplear más campos de control que permitan coordinar los sistemas remotos para solucionar problemas adicionales, como el control del flujo de los datos entre uno y otro, o la corrección de errores.

La **transmisión síncrona** es una técnica que consiste en el envío de una trama de datos (conjunto de caracteres o de bits) que conforma un bloque de información, comenzando con un conjunto de bits de sincronismo (uno o varios caracteres o una

secuencia especial de bits) y terminando con otro conjunto de final de bloque (uno o varios caracteres o una secuencia especial de bits).

A continuación se muestra un formato típico de trama en una transmisión síncrona.

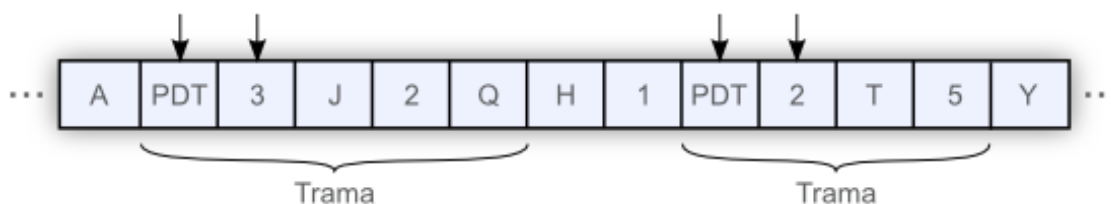


La trama comienza con un delimitador (carácter o *flag*) de inicio, que permite coordinar al emisor con el receptor, a la vez que habilita que el receptor sepa cuándo muestrear la línea. El final del bloque (trama) se delimita empleando un carácter de fin o el mismo delimitador (*flag*) empleado para delimitar el inicio, indicando al receptor que la información acaba y que por tanto puede finalizar su muestreo. Tras el delimitador de inicio, aparecerán algunos campos de control que permitirán que cuando el protocolo lo exija, se envíe información adicional entre extremos, como por ejemplo el conjunto de tramas que se van a enviar, la información de si los datos han llegado adecuadamente, etc. También es posible encontrar cabeceras de control al final de la trama, tras los datos a enviar. Por último, aparece el campo de los datos que el emisor envía al receptor.

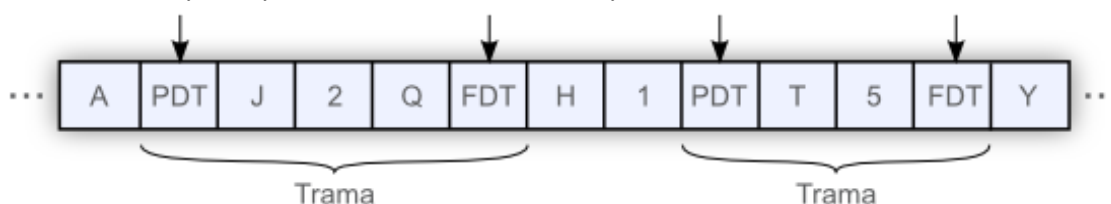
Delimitación de Trama

Con independencia de la técnica de transmisión usada, la delimitación de la información se puede realizar mediante alguna de las siguientes posibilidades:

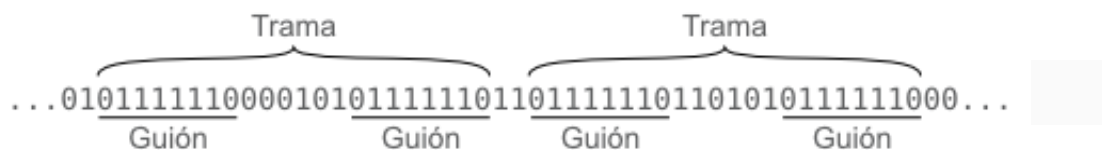
- **Principio y cuenta:** El bloque/trama se delimita mediante un carácter (o varios) que indican el principio de la trama. Este delimitador de principio irá seguido de uno o varios caracteres que codifican la longitud de la trama. De esta forma no es necesario un delimitador específico de final de trama y por tanto no hay necesidad de tomar ninguna medida especial para garantizar la transparencia de los datos. Este tipo de delimitación de trama no es demasiado empleada ya que resulta frágil ante errores de transmisión.



- **Principio y fin:** El bloque/trama se delimita mediante un carácter (o varios) que indican el principio de la trama y otro carácter (o varios) que indican su fin. En este caso surge el problema de qué hacer si en el campo de datos de la trama se quisiese transmitir el delimitador de final. Usualmente, se suele emplear como secuencia de inicio los caracteres ESC y STX y como secuencia de fin ESC y ETX.



- **Guiones:** El bloque/trama se delimita mediante una única secuencia de bits que indican tanto el principio de la trama como su fin. En este caso surge el problema de qué hacer si el guión se quisiese transmitir dentro de la propia trama. La secuencia empleada usualmente es (01111110). Aunque, puede parecer que la inserción de la delimitación por guiones es casi igual a la delimitación mediante principio y fin (y está claro que se parecen), la delimitación mediante guiones es claramente mejor (requiere menos información de control) ya que:
 - Usa delimitadores más cortos.
 - Se combina con la inserción de bit para garantizar la transparencia.
 - Permite transmitir bloques/tramas formadas por un número cualquiera de bits (y no por un número de caracteres).



Transparencia

Dependiendo de la forma de delimitar los bloques elegida, es necesario garantizar la **transparencia** en los datos. Para ello, y en función de la delimitación de trama usada (la delimitación mediante principio y cuenta ya es por si misma transparente) se puede emplear alguna de las dos siguientes opciones:

- **Inserción de carácter:** La inserción de carácter se emplea cuando la delimitación de trama se hace mediante "*Principio y fin*". El emisor insertará un carácter `ESC` cada vez que se encuentre con un delimitador dentro de los datos de la trama, pero no lo insertará cuando se lo encuentre formando parte de los delimitadores de inicio o fin. El receptor hará justo lo contrario, cuando encuentre dos caracteres `ESC` seguidos dejará solo uno y lo interpretará como un carácter normal (no formará parte de un delimitador). Por ejemplo, si queremos transmitir:

A B C ESC D ESC ETX ESC

se transmitirá:

ESC STX

A B C **ESC** ESC D **ESC** ESC ETX **ESC** ESC

ESC ETX

- **Inserción de bit:** La inserción de bit se emplea cuando la delimitación de trama se hace mediante "*guiones*". El emisor insertará un bit con valor "0" cada vez que se encuentre con 5 bits seguidos con valor "1" (dentro de la trama pero no en los guiones). El receptor hará lo contrario y si se encuentra 5 bits con valor "1" seguidos de uno con valor "0", eliminará el "0" y continuará con el siguiente bit. Si queremos transmitir:

101001001111101111110

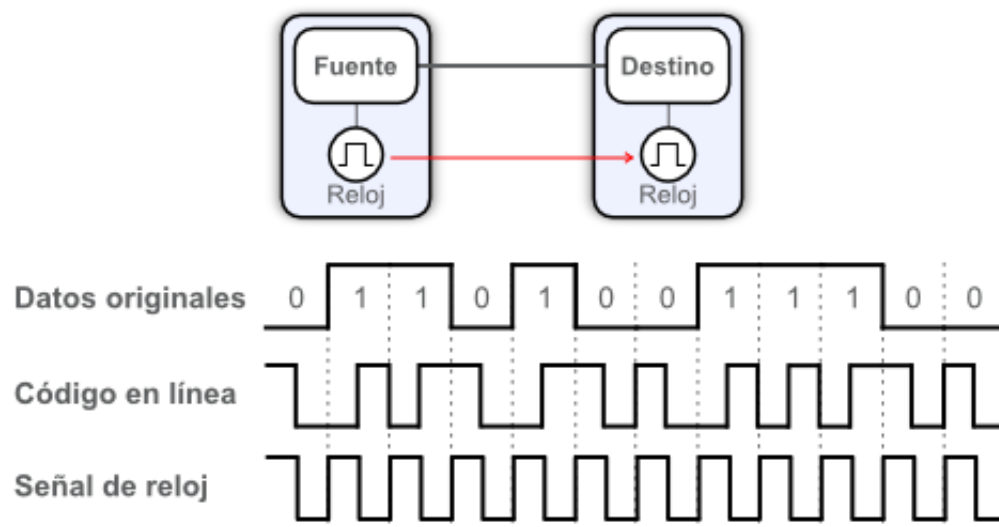
se transmitirá:

01111110 10100100111110011111010 01111110.

En el proceso de enviar los datos de un sistema a otro, es necesario que exista transparencia en los datos, o lo que es lo mismo, que los datos del emisor lleguen íntegros (tal y como son en origen) al receptor (fundamentalmente para prevenir los problemas que presentaría la aparición del delimitador de fin en los datos de usuario). Esta transparencia de tramas exige que se añada información de control extra.

En este caso, los bits de sincronismo tienen la función de sincronizar los relojes existentes tanto en el emisor como en el receptor, de tal forma que estos controlan la duración de cada bit y carácter.

Dicha transmisión se realiza con un ritmo marcado por un reloj (que puede ser generado de forma centralizada en la red, o bien por el equipo transmisor), y es el mismo para el emisor como para el receptor. A este respecto, el reloj puede ser transmitido por una línea independiente de la usada para transmitir los datos (circunstancia no muy recomendable en transmisiones a larga distancia), o bien puede transmitirse con los propios datos mediante una codificación adecuada de estos (por ejemplo empleando la codificación de Manchester o una codificación con retorno a cero).



Los bloques que se van a transmitir suelen tener un tamaño que oscila entre 128 y 1.024 bytes. Si se calcula el rendimiento cuando se transmiten bloques de 1.024 bytes, y se usan no más de 10 bytes de cabecera y terminación, el rendimiento de la transmisión supera el 99%.

Las **ventajas** de una transmisión síncrona son:

- Posee un **alto rendimiento** en la transmisión
- Son aptos para transmisiones de **altas velocidades** (iguales o mayores a 1.200 baudios de velocidad de modulación).
- El flujo de datos es más **regular**.

Si bien también tiene algún inconveniente, como por ejemplo que los equipamientos son de tecnología más compleja y de **costes más altos**.

Control de Flujo

Una vez enviadas las tramas, y asegurada la transparencia en los datos enviados, hay que garantizar que el emisor no sature al receptor con el envío de información. Esto se logra mediante la función de control de flujo, que le permite al receptor regular el flujo de datos que envía el emisor, en función de los datos que puede recibir y procesar.

Existen dos técnicas de control de flujo:

- **Parada y espera**, donde el origen envía una trama y espera a que el destino le indique que desea otra antes de continuar el envío.
- **Ventana deslizante**, donde se envían varias tramas antes de requerir que el destino indique que puede recibir más información.

Técnicas de detección y corrección de errores

En la transmisión de datos digitales se pueden producir fallos que alteran o eliminan uno o más bits en los datos transmitidos. Estos errores de transmisión son debidos a múltiples factores, siendo el ruido de la línea el más típico. Dependiendo del medio de transmisión y del tipo de codificación empleado, se pueden presentar otros tipos de anomalías como ruido de redondeo y atenuación, así como cruce de líneas y eco. Diversas aplicaciones como las transmisiones multimedia toleran una cierta cantidad de errores, pero para que muchas otras aplicaciones funcionen correctamente, las redes han de ser capaces de detectar y/o corregir los errores producidos en la transmisión.

Los errores producidos en la transmisión pueden ser **errores de bit**, que modifican el valor de un único bit, o **errores de ráfaga**, que afectan a una secuencia de bits, aunque no implica que se modifiquen todos los bits de dicha secuencia. Los errores de ráfaga son más comunes porque, normalmente, la duración del ruido o perturbación en la línea es muy superior al tiempo de transmisión de un único bit.

Para poder detectar o corregir errores de transmisión el emisor introduce una carga extra en la transmisión, denominada **redundancia**. Esta redundancia implica transmitir bits extra junto a los datos, y es eliminada por el receptor.

Existen diversas técnicas para detectar y corregir este tipo de errores, las cuales se clasifican en función del mecanismo de control de errores al que se pueden aplicar:

- **ARQ** (Automatic Repeat Request)
- **FEC** (Forward Error Control)

ARQ se basa en detectar los errores a su recepción, generalmente mediante códigos de paridad o códigos polinómicos, solicitando al origen que retransmita los datos dañados. El mecanismo FEC, sin embargo, permite que el destino detecte y corrija los errores producidos en la transmisión, puesto que incorpora un mayor nivel de redundancia que permite reconstruir los datos originales.

En este apartado se explica el funcionamiento de ambos mecanismos, y se introducen diversas técnicas que pueden ser utilizadas en cada uno de ellos.

Mecanismos de detección de errores ARQ

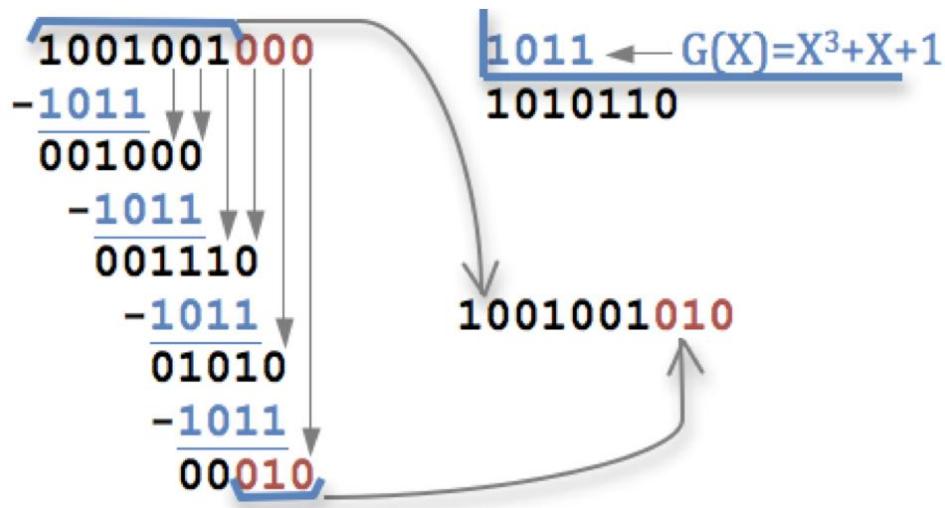
La detección de los errores se puede hacer principalmente mediante dos técnicas:

- **Códigos de paridad:** Estos códigos añaden un bit a cada palabra de m bits, de forma que se genera un código de $r=m+1$ bits. El bit añadido se denomina **bit de paridad**, y se genera de modo que el número total de 1's sea impar (paridad impar, más común) o par (paridad par). En la recepción se comprueba que el número total de 1's del código de r bits sea correcto, pudiendo detectar cualquier error que afecte a un número impar de bits. Si el número de 1's es correcto se extrae la palabra de datos de m bits.
- Una variante del uso de un bit de paridad es la comprobación de **paridad en dos dimensiones**. En este método se organizan los datos en matrices de j por k y se calcula el bit de paridad para cada una de las j filas y k columnas, enviándose la matriz de $j+1$ por $k+1$ como código al destino.
- **Comprobación de Redundancia Cíclica (CRC):** Los códigos CRC son un tipo de códigos cíclicos en los que cada palabra de m bits se representa por un código de r bits, y sólo los códigos de r bits que están asociados a una palabra son válidos. Teniendo en cuenta que $r > m$, existen múltiples palabras código que no son válidas. Estos códigos se denominan cíclicos porque a partir de cada código válido, cualquier rotación cíclica a la izquierda genera otro código válido.

El cálculo del código de r bits para una palabra de m bits se realiza de la siguiente forma: se concatenan $r-m$ ceros a derecha de la palabra de m bits, y el resultado es dividido entre un divisor determinado. La división realizada es una división en módulo 2, en la que no hay resto. El resto de dicha división se concatena con la palabra original para formar el código a transmitir.

El receptor realiza la misma operación, que consiste en dividir el código recibido por el mismo divisor (que comparte con el emisor). Si el resultado es 0, el código se ha recibido correctamente y se extraen los primeros m bits del código como palabra de datos; mientras que un resultado distinto de 0 indica que ha habido errores en la transmisión y se desecha el código.

El divisor, que es compartido entre el emisor y el receptor, se forma a partir de polinomios generadores. Por ejemplo, el polinomio $G(x) = x^3+x+1$ genera el dividendo 1011. La elección del polinomio generador influye en la capacidad del código CRC para detectar errores.



Con los mecanismos mencionados se pueden detectar errores producidos en la transmisión de un fragmento, pero no se puede detectar cualquier error, sino sólo aquellos para los que han sido diseñados. Además, no pueden corregir dichos errores. Para obtener los datos correctos cuando se ha detectado un error se utilizan mensajes de **confirmación** (confirmación de recepción correcta o de incorrecta), que son enviados en sentido contrario a los datos y permiten al origen conocer qué fragmentos de los datos han llegado con errores, para así reenviarlos.

Mecanismos para la corrección automática de errores FEC

En determinadas circunstancias, la estrategia de detección de errores no resulta adecuada. Por ejemplo, en transmisiones inalámbricas donde la tasa de errores es muy alta se produce un número excesivo de retransmisiones; además, en transmisiones con mucho retardo, como aquellas realizadas a través de satélite, la retransmisión resulta muy ineficiente. Por esta razón se utilizan métodos de detección de errores que, además, permiten identificar el bit (o los bits) modificados, para obtener el mensaje enviado sin necesidad de retransmisión.

Para la descripción de los mecanismos de corrección automática de errores se va a explicar primero el concepto de los **códigos de bloque**, que sirven tanto para detectar como para corregir errores de transmisión. Los códigos de bloque consisten en dividir la información a transmitir en palabras de m bits de longitud. Cada palabra tiene asociado un código de r bits que se transmitirá en su lugar, generalmente formado añadiendo $r-m$ bits a la palabra. Las diferentes técnicas existentes para la generación de estos códigos quedan fuera del alcance de la asignatura.

A continuación se muestra un ejemplo de código de bloque que transmite los datos en palabras de 3 bits, utilizando para ello códigos de 6 bits.

Palabra	Código
000	000111
001	001100

010	010001
011	011010
100	100010
101	101001
110	110100
111	111111

De los 2^r códigos disponibles, tan sólo 2^m se corresponden con una palabra y son, por tanto, **códigos válidos**. Si se recibe un código válido, se extrae la palabra asociada a dicho código; en cambio, si se recibe un código inválido se deduce que se ha producido un error y, en determinados casos, se puede corregir.

Es necesario destacar que los códigos de bloque sólo detectan o corrigen los errores para los que han sido diseñados. Por ejemplo, pueden estar diseñados para detectar errores de 2 bits en una palabra, o para corregir un único bit erróneo. Esta medida se basa en la *Distancia de Hamming*.

La **Distancia de Hamming** $d(v_1, v_2)$ de dos secuencias binarias v_1 y v_2 de r bits consiste en un valor numérico que indica el número de bits en los que v_1 y v_2 no coinciden.

Para cada código válido se calcula la *distancia de Hamming* con todos los demás, y de entre ellas se obtiene la *mínima distancia de Hamming*, d_{\min} . Esta distancia permite garantizar que, en una transmisión errónea:

- se pueden **detectar** hasta t errores, siendo $t = d_{\min} - 1$
- se pueden **corregir** hasta t errores, siempre que $d_{\min} \geq 2t + 1$

En circunstancias especiales se pueden detectar y/o corregir más errores, pero no está garantizado.

Para la corrección de errores utilizando códigos lineales, al recibir un código erróneo se puede calcular el código válido más próximo (según la *distancia de Hamming*), para así devolver la palabra asociada a dicho código válido. De esta forma, a partir de un código erróneo, hasta el límite de errores para el que se diseñó el código, se puede determinar qué palabra se transmitió en origen, no siendo necesario retransmitir los datos.

En el ejemplo anterior, si se recibe el código 100100, el único código que se encuentra a *distancia de Hamming* igual a 1 es 110100, por lo que se extrae la palabra 110 asociada a él.

Técnicas de conmutación

Conmutación de circuitos y paquetes

Hasta ahora se ha considerado la comunicación de dos sistemas remotos que se intercomunicaban a través de un simple enlace entre ellos. No obstante, la transmisión de datos a larga distancia se lleva a cabo a través de un sistema de transmisión formado por una red de nodos intermedios interconectados entre sí. Estos nodos intermedios se encargan de **almacenar** los datos que les llegan y **reenviarlos** a través de la red. Por ello se denominan nodos de **conmutación**: el contenido de los datos no les incumbe; en su lugar, su objetivo es conmutar esos datos para trasladarlos de un nodo hasta otro hasta alcanzar el destino final. Y para ello los nodos aplicarán distintas técnicas de conmutación.

Las **técnicas de conmutación** establecen las conexiones entre diferentes nodos de una red de telecomunicaciones, ubicados en distintos lugares y a distintas distancias, con el objetivo de lograr un camino apropiado para conectar dos sistemas de la red.

Los tipos de redes que se estudian en este apartado se denominan redes de comunicación conmutadas.

“Una **red conmutada** está formada por nodos y canales de comunicación entre los nodos”.



Las **redes de conmutación** se basan en la disposición de una serie de estaciones o nodos de conmutación conectados entre sí por una o varias líneas dedicadas, de forma que cuando se solicite el establecimiento de una comunicación o el envío de información, estos nodos establezcan un camino por donde puedan llegar los datos. Los nodos pueden ser computadoras especializadas o simples routers, dependiendo del tipo de red de conmutación de la que formen parte. Estos nodos de conmutación deben conocer parte de la topología de la red de comunicaciones a la que se encuentran conectados, para poder elegir rutas adecuadas a través de ella. También deben tener cuidado al escoger las rutas para no sobrecargar algunas líneas de comunicación, y solventar los problemas que surgen cuando el origen y el destino están en redes diferentes. Para resolver todas estas cuestiones, existen varias posibilidades de conmutación y por tanto, varios tipos de redes conmutadas:

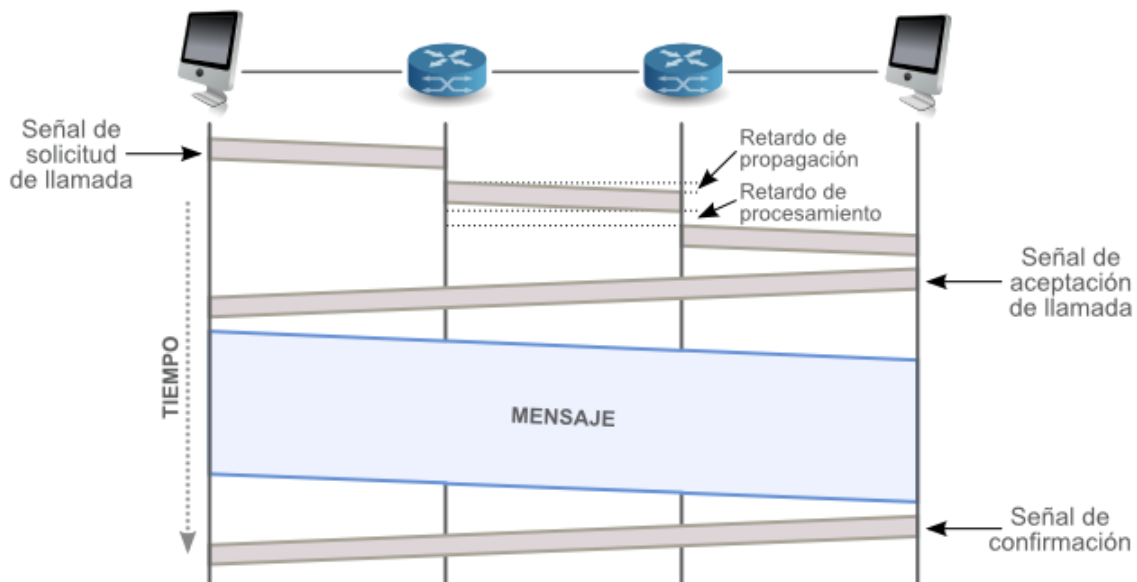
- Redes de conmutación de circuitos
- Redes de conmutación de paquetes, con dos subtipos, de *circuitos virtuales* o *datagramas*.

Conmutación de circuitos

Las técnicas de conmutación de circuitos tienen el objetivo de establecer una conexión física entre el sistema emisor y el sistema receptor. Los nodos de red intermedios reservan un enlace, y éste permanece dedicado durante toda la comunicación, de forma que no puede ser utilizado para ninguna otra comunicación hasta que sea liberado.

El ejemplo más representativo dentro de la conmutación de circuitos es la **red telefónica**. Su funcionamiento pasa por las siguientes etapas:

1. **Establecimiento de llamada:** El emisor solicita el establecimiento. El primer nodo reserva uno de sus canales para la comunicación y manda la solicitud al siguiente nodo, teniendo en cuenta las políticas de encaminamiento de la red; esta fase termina cuando existe un canal lógico entre emisor y receptor.
2. **Transferencia de información:** En esta fase se realiza intercambio de información entre los terminales (emisor y receptor).
3. **Liberación de la llamada:** En esta fase los terminales indican que ya han terminado su comunicación, los nodos van liberando el canal que estaba reservado.



Las principales **ventajas** de este mecanismo son las siguientes:

- La transmisión se realiza en tiempo real, siendo adecuado para comunicación de voz y video.
- Reserva de recursos. Los elementos/nodos que intervienen en la comunicación disponen en exclusiva del circuito establecido mientras dura la sesión.
- No hay contención. Una vez que se ha establecido el circuito las partes pueden comunicarse a la máxima velocidad que permita el medio, sin compartir el ancho de banda ni el tiempo de uso.
- El circuito es fijo. Dado que se dedica un circuito físico específicamente para esa sesión de comunicación, una vez establecido el circuito no hay pérdidas de tiempo calculando y tomando decisiones de encaminamiento en los nodos intermedios. Cada nodo

intermedio tiene una sola ruta para los paquetes entrantes y salientes que pertenecen a una sesión específica.

- Simplicidad en la gestión de los nodos intermedios. Una vez que se ha establecido el circuito físico, no hay que tomar más decisiones para encaminar los datos entre el origen y el destino.

Las principales **desventajas** que nos podemos encontrar son:

- Retraso en el inicio de la comunicación. Se necesita un tiempo para realizar la conexión, lo que conlleva un retraso en la transmisión de la información.
- Reserva (bloqueo) de recursos. No se aprovecha el circuito en los instantes de tiempo en que no hay transmisión entre las partes. Se desperdicia ancho de banda mientras las partes no están comunicándose.
- El circuito es fijo. No se reajusta la ruta de comunicación, adaptándola en cada posible instante al camino de menor costo entre los nodos. Una vez que se ha establecido el circuito, no se aprovechan los posibles caminos alternativos con menor coste que puedan surgir durante la sesión.
- Poco tolerante a fallos. Si un nodo intermedio falla, todo el circuito se viene abajo. Hay que volver a establecer conexiones desde el principio.

Conmutación de paquetes

Frente a la conmutación de circuitos, la conmutación de paquetes ofrece un mecanismo más eficiente que evita reservar enlaces en exclusiva para una comunicación. La idea de la conmutación de paquetes es aprovechar las características de compartición de la infraestructura de transmisión y conmutación, multiplexando la información de las diversas comunicaciones.

Los recursos de la red no se reservan con anterioridad, sino que se utilizan bajo demanda. La información se encapsula en bloques de pequeño tamaño denominados paquetes.

Un **paquete** es un grupo de dígitos binarios que incluyen datos e información de control, y que es tratada de forma autónoma por la red.

Los terminales envían la información fragmentada en paquetes al nodo de la red al que estén conectados. En cada nodo los paquetes se almacenan en las colas de entrada hasta que se procesan (conmutan). La conmutación consiste en decidir por qué línea de salida se envía el paquete, el cual es almacenado en las colas de salida hasta su transmisión por dicha línea.

En la conmutación de paquetes, el emisor divide los mensajes a enviar en un número arbitrario de paquetes del mismo tamaño, donde adjunta una cabecera y la dirección origen y destino así como datos de control que luego serán transmitidos por diferentes medios de conexión entre nodos temporales hasta llegar a su destino. Este método de conmutación es el que más se utiliza en las redes de computadores actuales. Surge para optimizar la capacidad de transmisión a través de las líneas existentes.

Cada uno de los paquetes contiene una parte de los datos de usuario además de información de control necesaria para el adecuado funcionamiento en la red:

$$\text{Paquete} = \text{DatosUsuario} + \text{InformaciónControl}$$

Los nodos de la red reciben un paquete, lo procesan y lo encaminan hacia destino. Los nodos temporales almacenan además los paquetes en colas en sus memorias que no necesitan ser demasiado grandes.

Las **ventajas** de la conmutación de mensajes son las siguientes:

- Aumenta la flexibilidad y rentabilidad de la red.
- En caso de error en un paquete solo se reenvía ese paquete, sin afectar a los demás que llegaron sin error.
- Comunicación interactiva. Al limitar el tamaño máximo del paquete, se asegura que ningún usuario pueda monopolizar una línea de transmisión durante mucho tiempo (microsegundos), por lo que las redes de conmutación de paquetes pueden manejar tráfico interactivo.
- Se puede alterar sobre la marcha el camino seguido por una comunicación (p.ej. en caso de avería de uno o más enrutadores).
- Se pueden asignar prioridades a los paquetes de una determinada comunicación. Así, un nodo puede seleccionar de su cola de paquetes en espera de ser transmitidos aquellos que tienen mayor prioridad.

Las **desventajas** destacables que se pueden reseñar de este tipo de conmutación son:

- Mayor complejidad en los equipos de conmutación intermedios, que necesitan mayor velocidad y capacidad de cálculo para determinar la ruta adecuada en cada paquete.
- Duplicidad de paquetes. Si un paquete tarda demasiado en llegar a su destino, el host receptor (destino) no enviara el acuse de recibo al emisor, por el cual el host emisor al no recibir un acuse de recibo por parte del receptor este volvera a retransmitir los ultimos paquetes del cual no recibio el acuse, pudiendo haber redundancia de datos.
- Si los cálculos de encaminamiento representan un porcentaje apreciable del tiempo de transmisión, el rendimiento del canal (información útil/información transmitida) disminuye.

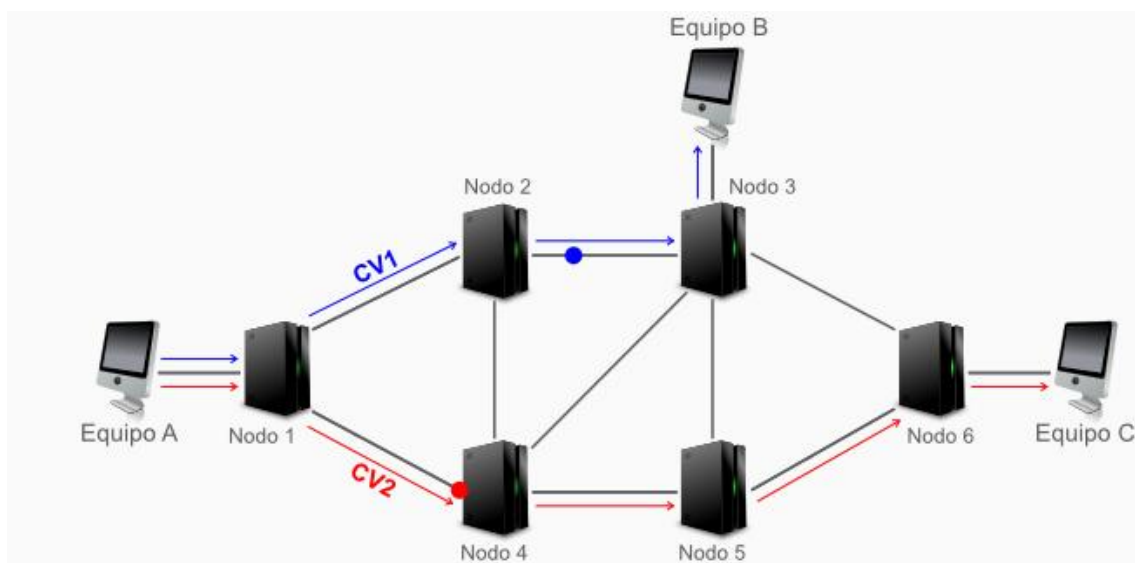
El diseño de las redes de paquetes trata de optimizarse para que el tránsito total de un paquete sea de unos pocos segundos. Este tipo de redes se han diseñado para proporcionar dos tipos diferentes de servicio: datagramas y circuitos virtuales.

Conmutación de circuitos virtuales

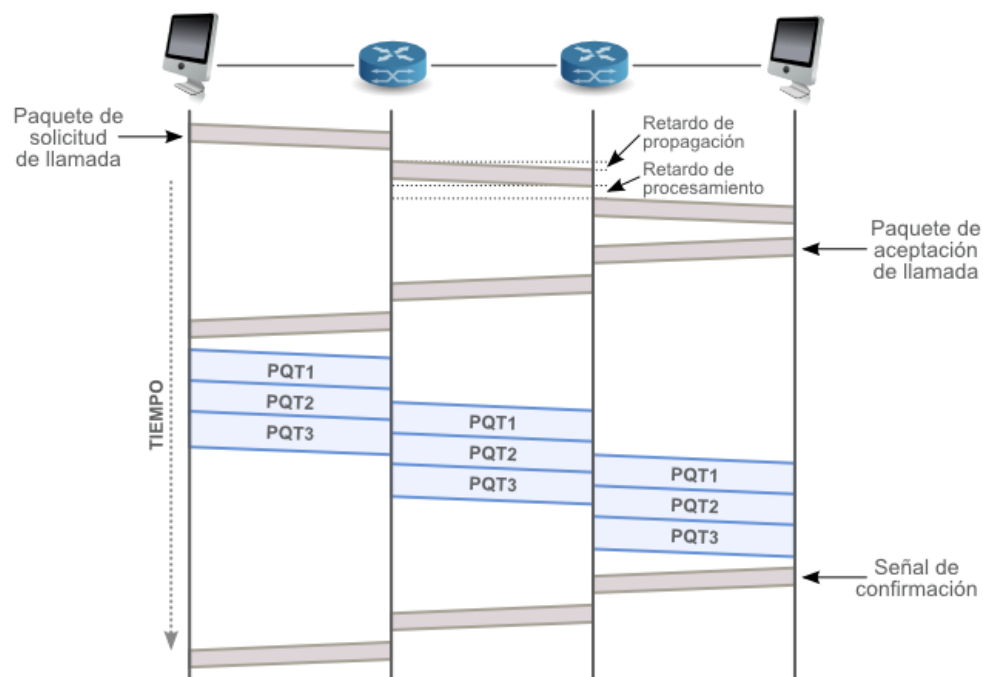
La técnica de conmutación de circuitos virtuales garantiza la entrega ordenada y sin errores de los paquetes al destino. Para ello establece primeramente una asociación entre el terminal origen y el terminal destino. El terminal que inicia la comunicación emplea un paquete especial con la dirección del destino. La red con este paquete, toma la decisión de encaminamiento que normalmente mantiene durante toda la comunicación para los demás paquetes. Por tanto, los paquetes de transferencia de datos no necesitan llevar dirección, sino una identificación de la comunicación a la que pertenecen y una numeración secuencial que le sirve a la red para mantener el orden.

Puede parecer que la conmutación de paquetes con servicio de circuito virtual es lo mismo que conmutación de circuitos. Nada más lejos, ya que la eficiencia del primer modelo es mucho mayor que la segundo. Aunque para el usuario ambas trabajan igual, en realidad el circuito virtual utiliza una misma línea para varias comunicaciones y no reserva ningún tipo de recurso al establecer el contacto.

Cuando se utilizan circuitos virtuales, el emisor envía un primer paquete de establecimiento de conexión y los nodos establecen un circuito virtual. Después, los paquetes que se envían no tienen ya que ser encaminados, puesto que en este caso existe un camino lógico predefinido. La siguiente figura muestra este caso para una tipología de nodos de red, como la vista anteriormente en el caso de Internet.



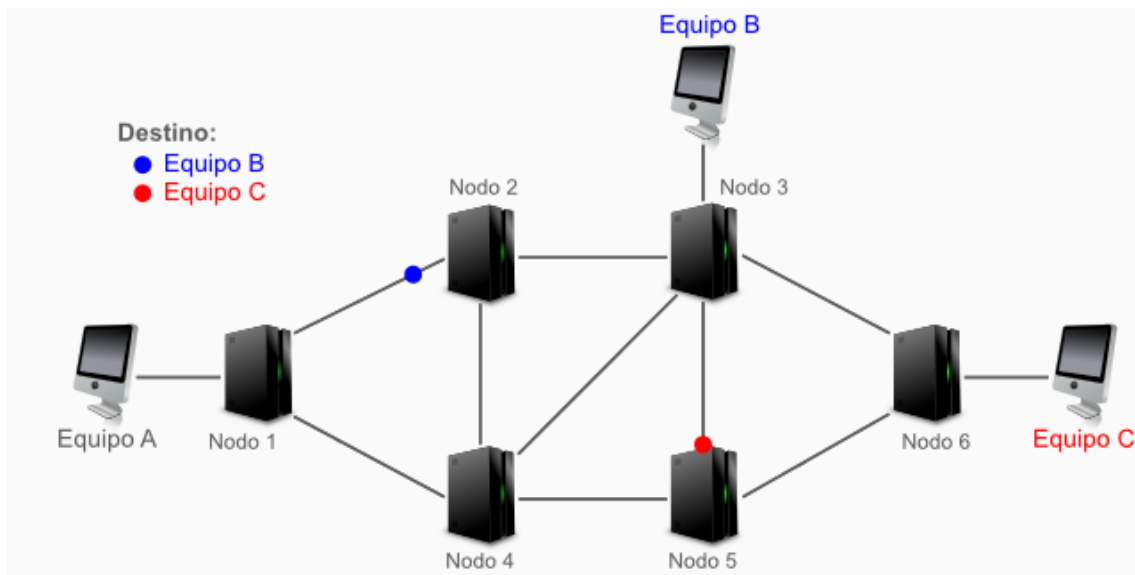
En este modo cada paquete se encamina por el mismo circuito virtual que los anteriores. Por tanto se controla y asegura el orden de llegada de los paquetes a destino. A continuación se muestra el esquema de comunicaciones que sigue este tipo de conmutación de paquetes:



Conmutación de datagramas

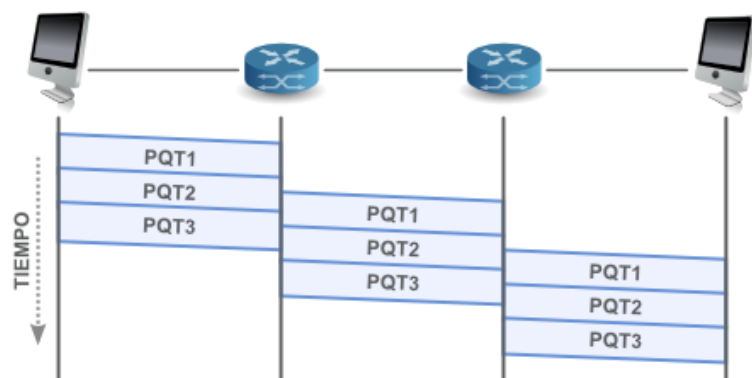
La técnica de conmutación de datagramas trata de forma independiente cada unidad de información, en este caso llamada **datagrama**, tomando decisiones de encaminamiento para cada uno de ellos. Las redes de paquetes suelen tener topologías fuertemente interconectadas (existen muchos caminos redundantes entre dos nodos), y por ello puede ocurrir que dos paquetes de una misma comunicación tomen caminos distintos, e incluso lleguen desordenados. Por otra parte, la red no garantiza la entrega de los datagramas porque, en situaciones de congestión o de fallo de los nodos, los datagramas pueden perderse o ser descartados. En resumen, la red acepta datagramas y hace lo posible por entregarlos a su destino.

El emisor añade información de control a los datagramas (entre otras cosas la dirección del nodo origen y la del destino) y los envía, con lo que cada datagrama se procesa de forma independiente en los nodos de la red. Solo es necesaria la fase de transferencia de datos.



En este modo de conmutación de paquetes, cada paquete se encamina de manera independiente de los demás (cada nodo procesa cada uno de los paquetes y decide cual es el mejor camino para enviarlo). Por tanto la red no puede controlar el camino seguido por los paquetes, ni asegurar el orden de llegada a destino (cada paquete puede seguir un camino distinto y tardar un tiempo distinto en llegar al destino).

A continuación se muestra el esquema de comunicaciones que sigue este tipo de conmutación de paquetes:



Ejemplos de redes de conmutación

Redes de conmutación de tramas

Una alternativa a la conmutación de circuitos y paquetes es la **conmutación rápida de paquetes** (Conmutación *Fast Packet*), la cual puede ser de dos tipologías:

- Transmisión de celdas (*Cell Relay*)
- Transmisión de tramas (*Frame Relay*)

Su funcionamiento es muy similar al de las redes de conmutación de paquetes orientadas al circuito virtual, aunque existe un elemento que las diferencia: las redes de conmutación de paquetes, lógicamente, conmutan paquetes (la unidad de datos del nivel de red, nivel tres), mientras que las redes de conmutación rápida de paquetes realmente conmutan tramas (la unidad de datos de nivel de enlace, nivel dos).

Esta simplificación en la arquitectura (conmutar unidades de nivel de red en lugar de unidades de nivel de enlace) permite un funcionamiento más rápido y eficiente de la red (conmutar muchos más paquetes por segundo).

Existen una serie de aspectos comunes entre ambas tecnologías, y por tanto, inherentes a la conmutación rápida de paquetes:

- La red realiza una verificación mínima de errores, y las tramas con errores se descartan.
- La red no realiza ninguna corrección de errores, asume que será realizada por el usuario final que usa protocolos de niveles superiores.
- La red ofrece un servicio poco fiable (lo que se deriva de los dos anteriores puntos).

Aunque existen muchos e importantes aspectos comunes, existe un aspecto que distingue claramente las dos tecnologías.

- La **longitud de la unidad de información**. Las redes de conmutación de tramas (*Frame Relay*) emplean tramas de **longitud variable**, mientras que en las de conmutación de celdas (*Cell Relay*) las tramas son de **longitud fija** (las tramas siempre tienen la misma longitud, con independencia de la cantidad de datos de usuario que transporten).

Como ejemplo de estas dos tecnologías se pueden citar las redes "*Frame Relay*" (conmutación rápida de tramas) y **ATM** (*Asynchronous Transfer Mode*) como ejemplo de una red "*Cell Relay*".

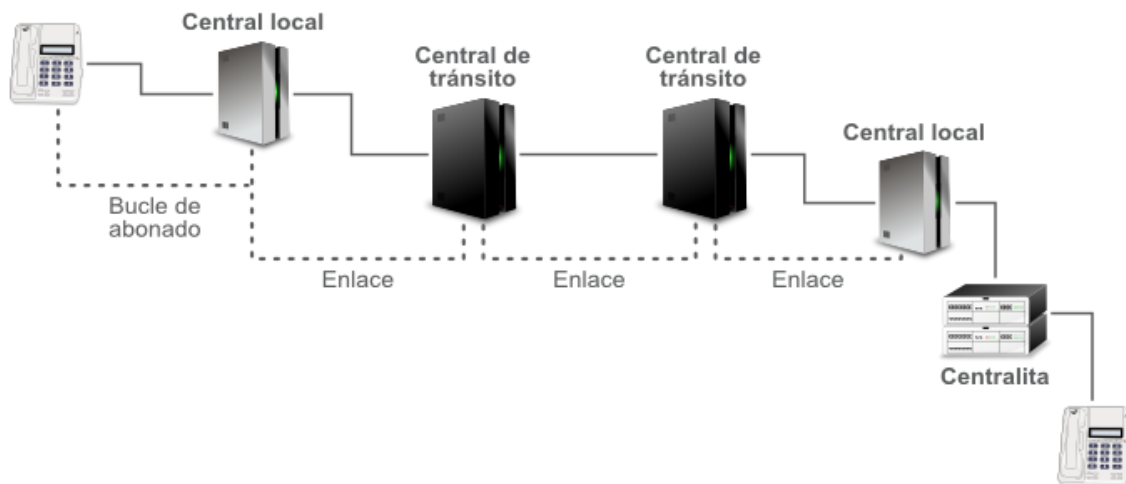
Redes Telefónicas

La primera solución que surgió para satisfacer las necesidades de intercomunicación distante entre empresas (o usuarios) fueron las redes telefónicas. Existen dos tecnologías fundamentales para el establecimiento de redes de telefonía: la red telefónica convencional (RTC) y la red digital de servicios integrados (RDSI), que es algo más compleja y emplea señalización en paquetes (sobre LAPD) y que multiplexa dos canales de comunicación más uno de señalización por el mismo cable (actualmente RDSI no evoluciona, es caro y a dejado su lugar a ADSL).

Red Telefónica convencional (RTC)

En la red telefónica, cuando un interlocutor habla genera una información que debe transmitirse a lo largo de la red. Es necesario además llevar a cabo una señalización para aportar información acerca de cómo establecer el camino. Al marcar existe un proceso de señalización estandarizado denominado SS7 que también se utiliza en la telefonía móvil, donde los operadores se interconectan casi siempre con GSM (2G) y usan SS7 con lo que de forma transparente se establece la comunicación con facilidad.

El par de cobre transmite a 4 KHz, y mientras que la transmisión entre el terminal y la primera central es analógica, a partir de ella toda la transmisión es digital, gracias a un muestreo MIC.

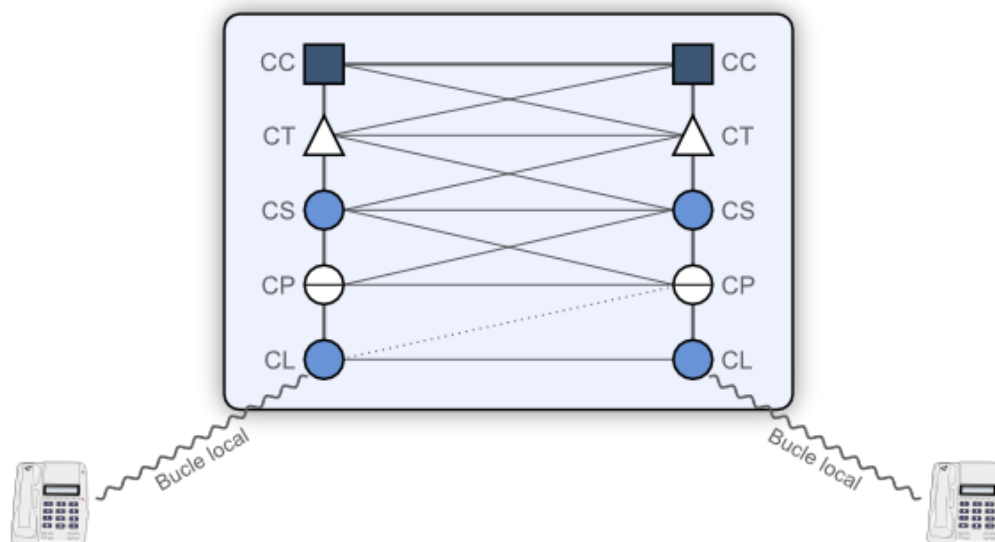


Como se puede apreciar en la figura, hay escalas entre centrales de tránsito, y en las empresas a menudo surgen centralitas de gestión, que por ejemplo, reciben 2 líneas y permiten en su extremo opuesto 40 conexiones (dado que no se usan todas a la vez).

El conversor analógico-digital MIC establece por cada par 30 conexiones simultáneas más 2 de control/señalización. Una vez convertida la señal a formato digital es enviada a una central de conmutación que realizará dos operaciones: conmutación espacial (física o de cambio de canal) y temporal dentro de esos 30 canales simultáneos.

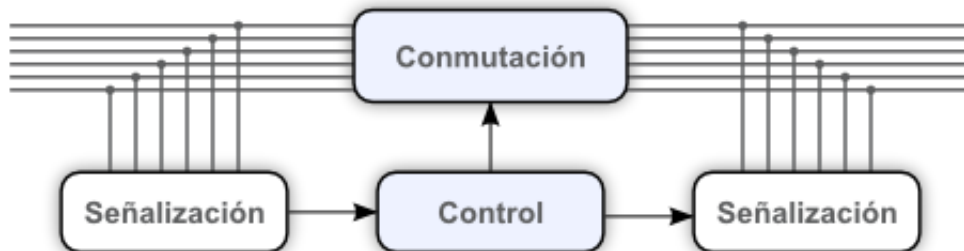
Estructura de red

A continuación se muestra la figura de una estructura de red RTC:

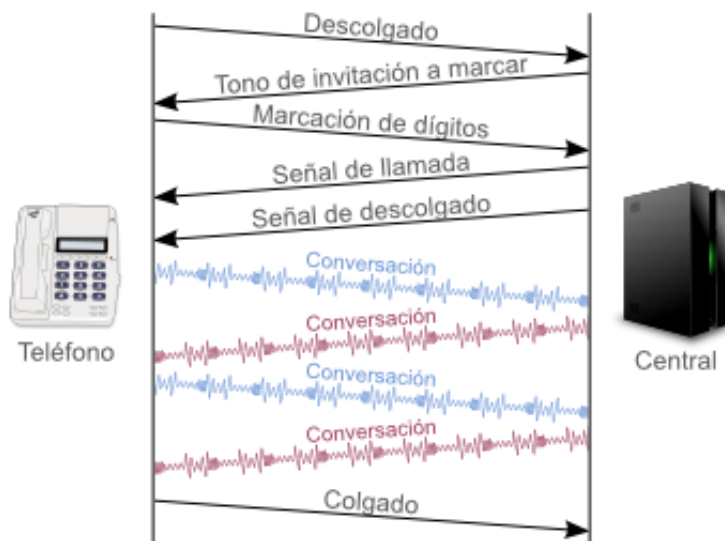


En ella es posible identificar los bucles de acceso teléfono-central local con transmisión analógica así como la conmutación de circuitos explicada anteriormente.

Una central telefónica tiene tres funciones fundamentales:



- Señalización: al establecer la llamada decide cómo conmutar y establecer un canal de comunicación.



- Conmutación: La información llega tras la multiplexación MIC 30+2 en 32 muestras de 8 bits por cada comunicación en cada línea. Se debe poder conmutar una comunicación concreta (de las 32) de un canal a otra ranura de la misma línea o de otro canal distinto, es decir, conmutación física y/o temporal.
- Control: Se debe almacenar la información de todas las conmutaciones realizadas guardando en memoria temporal cuales son las comunicaciones y cómo se han conmutado. El retardo de acceso a esta información es despreciable.

Al margen de las centrales, va a ser necesario emplear concentradores si la distancia a la centralita es superior a unos 10 km.

Red Digital de Servicios Integrados (RDSI)

La Red Digital de Servicios Integrados (RDSI ó ISDN, del inglés *Integrated Services Digital Network*) surgió como evolución a la red telefónica conmutada, a la que pretendía reemplazar ofreciendo una variedad de servicios digitales sobre el mismo enlace. RDSI pretendía completar la actualización de las redes de telefonía analógicas en digitales, haciendo digital el último tramo, comprendido entre las centrales y los teléfonos. Sin embargo, no ha tenido la

acogida esperada y ha sido desbancada generalmente por líneas ADSL que ofrecen acceso a Internet a mayores velocidades.

RDSI ofrece múltiples canales digitales que pueden operar simultáneamente a través de la misma conexión telefónica entre central y usuario, obteniendo mayores velocidades de transferencia de datos que sobre una línea RTC convencional, pero muy inferiores a las logradas por ADSL. RDSI integra en un mismo acceso múltiples servicios, que antiguamente se ofrecían sobre líneas dedicadas. Sobre una línea se pueden ofrecer telex, fax, videoconferencia, acceso a Internet, y servicios adicionales como llamada en espera o identificación del número origen.

Para ofrecer estos servicios, RDSI utiliza diferentes canales, basados tanto en conmutación de circuitos como en conmutación de paquetes. La configuración del tipo y número de canales depende del tipo de acceso RDSI:

- **Acceso Básico:** Proporciona dos canales B de conmutación de circuitos, y un canal D de conmutación de paquetes de 16 kbps. Los canales B transmiten información a 64 kbps, ya sean datos o voz, y están basados en conmutación de circuitos. Cuando se utilizan para transmitir voz, ésta se codifica según el estándar MIC a 64 kbps. Estos canales no transportan información de control de RDSI, aunque sí pueden combinarse para ofrecer un canal de mayor capacidad. El canal D se utiliza para enviar información de control, tal como la señalización de las llamadas. En el acceso básico, el canal D ofrece una velocidad de 64 kbps. La velocidad total de un acceso básico es $2 \times 64 + 16 = 144$ kbps. Con un acceso básico se pueden establecer dos comunicaciones de voz, utilizar simultáneamente una conexión de voz y una de datos, o utilizar los dos canales B para establecer una comunicación de datos de 128 kbps. En alguna configuración se ha podido incluso utilizar el ancho de banda del canal D para transmitir datos de usuario por el mismo.
- **Acceso Primario:** El acceso primario en Europa está compuesto de 30 canales B y un canal D de 64 kbps, alcanzando una velocidad total de 1984 kbps. El aumento del número de canales incrementa el tráfico de señalización, por lo que el canal D, basado en conmutación de paquetes, es de mayor ancho de banda que en un acceso básico.. Con un acceso primario es posible establecer 30 llamadas simultáneas, o combinar los canales B para ofrecer canales de datos de mayor ancho de banda.