



DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA
CURSO 2011-2012

Ingeniería Informática
Telemática y Sistemas de Transmisión de Datos

Tema 1
Arquitectura de un Sistema Teleinformático

Prof. Juan Manuel Orduña Huertas

Índice general

1. Estructura de un sistema teleinformático	1
1.1. Introducción	1
1.2. La normalización de las telecomunicaciones	4
1.3. Nomenclaturas Arpanet e ITU-T	5
1.4. Topologías para la subred	6
2. Realización de un sistema teleinformático	8
2.1. Organización en capas o niveles	8
2.2. Consideraciones de diseño de la solución por niveles	10
3. Arquitectura ISO/OSI	12
3.1. Las capas o niveles OSI	12
3.2. Transmisión de datos en el modelo OSI	14
3.3. Modelo TCP/IP. Comparación con el modelo OSI	15

4. Servicios de comunicación de datos. Tecnologías WAN	16
4.1. Tipos de conmutación	16
4.2. Tecnologías WAN	18
4.2.1. X.25	20
4.2.2. Frame Relay	20
5. Nivel Físico: Modelo de un sistema de comunicación	22
5.1. Descripción del modelo	22
5.2. Conceptos básicos sobre análisis de señales	23
5.2.1. Conceptos básicos	23
5.2.2. Ancho de banda y velocidad de transmisión	31
5.2.3. Potencia de una señal	34
Teorema de Parseval	36
5.3. Problemática del sistema de comunicación	36
6. Análisis de Fourier	38
6.1. Series de Fourier	38
6.1.1. Expresión trigonométrica de las Series de Fourier	38
6.1.2. Expresión compleja de las fórmulas de Fourier	39
6.2. Transformada de Fourier	42
6.2.1. Propiedades de la transformada de Fourier	43
7. Ejercicios	46
Bibliografía	48

1 ESTRUCTURA DE UN SISTEMA TELEINFORMÁTICO

1.1. Introducción

La *Informática* se define como el tratamiento automático de la información. La máquina que lo realiza es la computadora. En un principio las computadoras eran máquinas aisladas, que procesaban unos datos de entrada para proporcionar unos datos de salida o resultados. Sin embargo, en la década de los 70 la Agencia Estadounidense de Investigación en Proyectos Avanzados (en inglés ARPA, Advanced Research Project Agency) decidió llevar a cabo un proyecto para conectar entre sí todos los computadores del gobierno de los EE.UU.. (El motivo era que ante un ataque nuclear soviético que pudiera destruir alguno de los computadores militares, la interconexión en red de los computadores permitiría tener copias de la información y seguir manteniendo “capacidad de respuesta nuclear”). Posteriormente, las Universidades de EE.UU. también fueron conectando sus computadores a esta red, para compartir información. Seguidamente, ocurrió lo mismo con las Universidades en otros países. En España, por ejemplo, se creó en la década de los 80 la Red Iris (<http://www.rediris.es>) que agrupaba a todos los centros de investigación del país. Finalmente, estas redes se interconectaron entre sí, y se dió acceso a los computadores personales, creando lo que hoy se conoce popularmente como *internet*.

Así pues, en la actualidad las computadoras tienden a interconectarse, formando **redes de computadoras**, con los siguientes objetivos:

1. Compartir los recursos, ya sean de tipo software (datos y programas) como hardware (impresoras, discos, etc).
2. Mejorar la fiabilidad. Al conectar varias máquinas se pueden realizar copias de segu-

ridad fácilmente, permitiendo que otra máquina utilice los datos o programas almacenados en dichas copias en caso de fallo.

3. Abaratar costes. Las computadoras pequeñas tienen una relación coste/prestaciones mucho mejor que los grandes *mainframes*. Por eso se han diseñado muchos sistemas como redes de computadoras con servidores y clientes que acceden a los servicios del servidor utilizando la red.

En el momento en el se se conectan dos computadoras entre sí podemos hablar de un **sistema teleinformático**: Sistema informático en el que existe una transmisión de datos entre computadoras o bien entre una computadora y alguno de sus periféricos ubicados en distinta carcasa.

Se han realizado múltiples clasificaciones de los sistemas teleinformáticos, aunque una de las más extendidas es la que atiende a la distancia que abarca el sistema, y que aparece en [6]. La figura 1.1 muestra dicha clasificación.

Interprocessor distance	Processors located in same	Example
0.1 m	Circuit board	Data flow machine
1 m	System	Multicomputer
10 m	Room	Local area network
100 m	Building	
1 km	Campus	
10 km	City	Metropolitan area network
100 km	Country	Wide area network
1,000 km	Continent	
10,000 km	Planet	The Internet

Figura 1.1: Clasificación de Sistemas Teleinformáticos según su escala

Así, cuando hablamos de sistemas que abarcan sólo una o varias tarjetas de circuito impreso instaladas en una carcasa, estaremos hablando de **sistemas multiprocesadores**.

Si el sistema abarca una extensión de entre 10 metros y 1 km aproximadamente (es decir, sistemas que tienen un tamaño de entre una habitación y un campus), estaremos hablando de una **red de área local** (en inglés **lan**, de local area network. Finalmente, los sistemas que se distribuyen por toda una ciudad o un área mayor diremos que son **redes de área extensa**, o en inglés, **wan**, de wide area network.

También se puede diferenciar un sistema teleinformático según el sistema físico empleado para interconectar sus computadores. Así, se puede hablar de una red basada en el sistema telefónico (estos suelen coincidir con las redes wan) o un sistema que utiliza un cableado privado (suelen coincidir con las redes de área local).

Finalmente, una clasificación muy importante es la que diferencia a las redes según el modo de transmitir la información:

- **Redes de difusión (broadcast)** En estas redes lo que una estación emite lo escuchan todas las demás, ya que todas las estaciones comparten el mismo medio de transmisión.
- **Redes punto a punto** En estas redes cada conexión física une exclusivamente dos estaciones (computadores) entre sí. La conexión entre dos computadores no conectados directamente se hace atravesando nodos intermedios. Estos nodos intermedios tienen que encaminar la información hacia su destino, y a veces también conmutar entre varios canales de entrada. El conjunto de routers y/o conmutadores y los enlaces que unen dos computadores dados forman la **subred**

Los primeros sistemas teleinformáticos eran **sistemas cerrados**, es decir, todos los elementos que intervenían en la conexión entre dos máquinas (incluyendo las propias máquinas computadoras) eran del mismo fabricante. Este era el que establecía sus propias normas a la hora de diseñar todo el sistema. El resultado fue que los conectores, los niveles eléctricos de las señales, las propias señales, la temporización de las mismas, etc, eran diferentes según el fabricante. Por tanto, era imposible conectar entre sí dos máquinas de distinto fabricante. Esto llevó a la necesidad de estandarizar la conexión de los sistemas teleinformáticos. De esta forma, se denomina *sistema propietario* a aquel sistema teleinformático que sigue las normas propias del fabricante. Y se denominan **sistemas abiertos** (en inglés **open systems**) a aquellos sistemas que se ajustan a los estándares internacionales que especifican cómo se debe realizar la conexión entre computadoras. Los sistemas cerrados por tanto obligan al usuario a conectar su máquina con otra máquina del mismo fabricante, mientras que un sistema abierto se puede conectar con cualquier otra máquina de cualquier fabricante que también sea un sistema abierto.

1.2. La normalización de las telecomunicaciones

El problema a la hora de estandarizar a nivel internacional la conexión entre dos computadoras es que existen varios organismos e instituciones oficiales que se dedican a la estandarización, con lo cual a veces un fabricante tiene varias posibilidades. Vamos a ver cuáles son los organismos e instituciones principales que trabajan para la estandarización, ya que a lo largo de este curso se van a nombrar con frecuencia, y proporcionan elementos de referencia indispensables en el trabajo de todo ingeniero informático. Comenzaremos por las instituciones internacionales oficiales [5]. A continuación veremos también las asociaciones e instituciones no oficiales a nivel internacional, es decir aquellas que por su influencia en la industria han convertido sus recomendaciones en estándares "de facto", e instituciones que trabajan de forma paralela a las instituciones oficiales internacionales.

- **ISO: International Standard Organization.** Es una agencia internacional para el desarrollo de normalizaciones o estandarizaciones. La mayoría de sus miembros son instituciones gubernamentales u organizaciones que están estrechamente ligadas a las administraciones públicas de los distintos países. Se fundó en 1946 y desde entonces ha establecido más de 5000 normalizaciones en todo tipo de áreas de distinta disciplina, desde el diámetro de tornillos hasta temas de energía solar o normas de calidad. Pues bien, un sector de esta organización se encarga de la arquitectura de comunicaciones para la interconexión de sistemas abiertos.
- **ITU-T: International Telecommunications Union-Telecommunications sector.** La ITU es una agencia especializada de la Organización de las Naciones Unidas. Este organismo (el ITU-T) sustituye a un organismo llamado **CCITT, Comité Consultivo Internacional de Teléfonos y Telégrafos**, que era el organismo internacional que normalizaba las comunicaciones telefónicas entre distintos países y/o compañías telefónicas y de telégrafos.

Estos son los principales organismos oficiales internacionales de normalización. En cuanto a los no oficiales, los más importantes son:

- **ANSI: American National Standards Institute.** Es una agencia americana miembro de la ISO, pero que trabaja "en paralelo" (es decir, pasando de todo) con la ISO, debido, según los americanos, "a las diferentes características de los sistemas americanos".

- **EIA: Electronic Industries Association.** Es una asociación de fabricantes de electrónica que publicaba sus propios estándares, aunque en los últimos años ya ha intentado acoplarse a las instituciones oficiales internacionales. Su estándar más conocido es el EIA RS-232 (el puerto serie de los PC's)
- **IEEE: Institute of Electrical and Electronic Engineers.** Es una organización profesional del más alto prestigio, que propone normalizaciones no sólo en el campo de las redes de computadoras, sino en muchas otras disciplinas. En concreto el área de las redes de computadoras es la numerada como 802 en la nomenclatura del IEEE. Más información sobre esta organización en su página web (<http://www.ieee.org/>).

1.3. Nomenclaturas Arpanet e ITU-T

Históricamente el origen de la Internet o red de redes de computadoras fue la red Arpa (que viene de *Advanced Project Research Agency Network* o red de la agencia de investigación de proyectos avanzados). Esta agencia era una institución del Departamento de Defensa de los EE.UU., y decidió que era conveniente conectar entre sí los computadores de la Agencia y los de las universidades más importantes. A partir de este núcleo cada vez se fueron conectando más universidades a dicha red, hasta hoy en día. Por ello cuando se habla de redes de computadoras con frecuencia se utiliza la terminología establecida por la Arpanet. Según dicha terminología, una red de computadoras está compuesta por dos elementos:

- **Host :** Máquinas que ejecutan procesos de usuarios (típicamente computadoras)
- **Subred :** Es el conjunto de elementos que permiten el paso de información de un host a otro. Dentro de la subred hay dos tipos de elementos:
 - **IMP (Interface Message Processor) :** Computadores dedicados exclusivamente a ejecutar programas de comunicaciones.
 - **Línea de transmisión :** Medio físico a través del cual se realiza la transmisión.

Por otro lado, la ITU estandarizó la nomenclatura de los elementos de un sistema teleinformático como sigue:

- **ETD (Equipo Terminal de Datos)** : Máquinas que ejecutan procesos de usuarios (típicamente computadoras). Equivale al término *host* de la nomenclatura ARPANET.
- **ETCD (Equipo Terminal de Circuito de Datos)** : Este término no equivale al término *IMP* de la nomenclatura ARPANET, sino que denota a un elemento transformador de la señal, típicamente el modem.

La ITU define sólo los elementos que intervienen en la conexión a la subred. Considera que la subred es pública, y su gestión ajena al usuario. No hay que olvidar que tradicionalmente la ITU se componía de compañías telefónicas, las mayoría de las cuales ejercía el monopolio dentro de su respectivo país.

1.4. Topologías para la subred

En general la subred que interconecta a los hosts entre sí, y a la que hacen referencia las nomenclaturas expuestas anteriormente, puede estar constituida por:

- **Líneas punto a punto:** En este caso cada línea de transmisión une 2 IMP's entre sí. Dos IMP's no contiguos se comunican mediante otros IMP's, por lo que se necesitan mecanismos de encaminamiento. En este tipo de redes es fundamental la **topología** de la red, es decir, disposición física en la que se interconectan los distintos IMP's. La figura 1.2 muestra varias posibles topologías de red punto a punto.
- **Líneas multipunto o de difusión:** En estas redes existe un único canal de comunicación, al cual se conectan todos los IMP's. De esta forma, todo lo que un IMP transmite puede ser recibido por el resto de IMP's. Por ello, sólo un IMP puede transmitir simultáneamente. Este tipo de redes también se denominan de **difusión** o, en inglés, **broadcasting**. La figura 1.3 muestra varias posibles topologías de red de difusión.

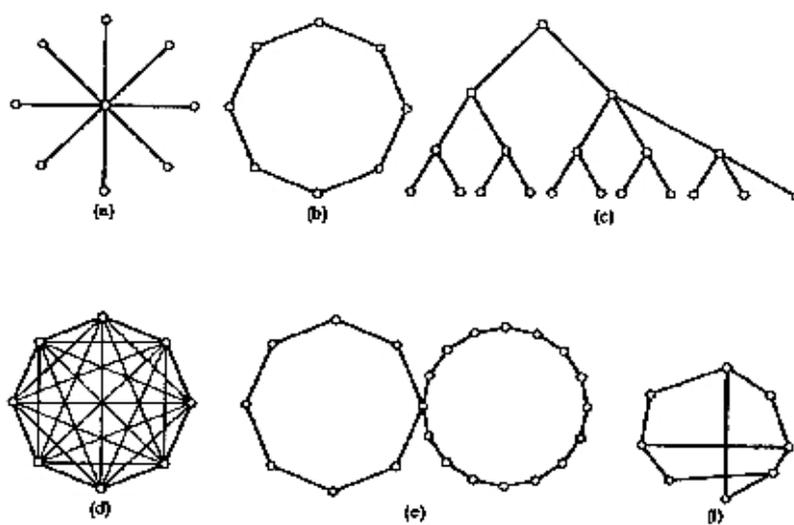


Figura 1.2: Topologías para redes punto a punto

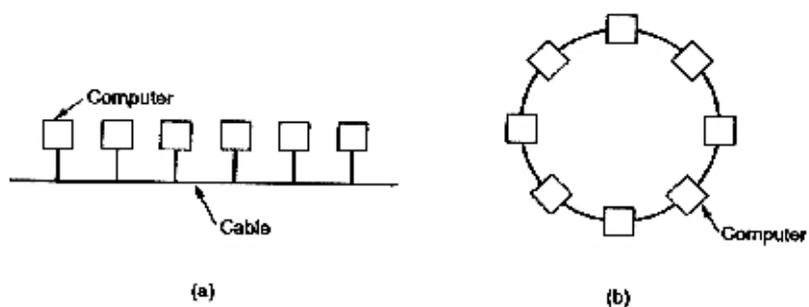


Figura 1.3: Topologías para redes de difusión

2 REALIZACIÓN DE UN SISTEMA TELEINFORMÁTICO

2.1. Organización en capas o niveles

En esta sección vamos a plantear cómo desarrollar una aplicación, incluyendo el hardware y el software necesario, que permita conectar dos o más computadores entre sí.

En los primeros tiempos de la informática se optó por una solución monolítica. Esta solución consistía en que un único programa, la propia aplicación, incluía todas las funciones necesarias para comunicarse con una aplicación análoga en otro computador. Estas funciones , entre otras, son las siguientes:

- Transmisión de los bits
- Detección y corrección de errores
- Conversión de formatos
- Encaminamiento de la información por la subred
- Segmentación y reconstrucción del mensaje en destino
- Encriptado de datos
- Funciones propias de la aplicación (transf. ficheros, etc.)

Esta solución presentaba grandes inconvenientes:

- Las aplicaciones requerían una gran cantidad de memoria, ya que todos tenían una gran cantidad de funciones a realizar.

- Un computador tenía que soportar varias aplicaciones enormes cuya mayor parte del código estaba destinado a realizar las mismas funciones.
- Como cada aplicación se hacía para controlar el hardware sobre el que se iba a realizar la transmisión, las aplicaciones eran dependientes de la arquitectura del computador.

Por todo ello, las funciones a realizar en la comunicación entre dos computadores se estructuraron en niveles. La idea era que cada nivel pudiera tener sus reglas o **protocolos**, independientemente del resto de los niveles. Lo único que deben cumplir de cara al resto de los niveles es mantener una **interfaz** concreta con el nivel superior y el inferior. De esta forma puede variar la forma de construir los niveles, mientras los servicios ofrecidos en las interfaces sean los mismos.

Un ejemplo de esta organización por niveles lo podemos observar en la figura 2.1. Esta figura muestra una solución estructurada para la comunicación de dos filósofos, uno chino y otro hindú, cuando quieren comunicarse entre sí. El filósofo hindú habla en inglés, y el chino en francés. Estos serían equivalentes a los procesos de (supongamos) el nivel 3 en cada uno de los computadores, A, y B. Pues bien, para que el proceso de nivel 3 del computador A (filósofo hindú) se comunique con el proceso de nivel 3 del computador B (filósofo chino), utilizan los traductores, que serían el equivalente de los procesos de nivel 2 en cada uno de los lados A y B. Los traductores acuerdan el uso del holandés como idioma neutral. Así, en este caso el protocolo de nivel 2 sería traducir al holandés. A su vez, cada traductor tiene una secretaria (proceso de nivel 1) en cada extremo. Las secretarias acuerdan usar el fax para enviar los mensajes. Por tanto, el protocolo de nivel 1 en este caso sería el fax.

Pues bien, el proceso para que el filósofo hindú envíe un mensaje al filósofo chino es el siguiente: dictará el mensaje original (en inglés) a su traductora. Esta lo traducirá al holandés y le añadirá una indicación de que está traducido al holandés. Esta información será utilizada por el traductor remoto. A su vez, la traductora de A lo pasará a la secretaria de A. Esta lo transmitirá todo por fax, añadiendo el número de fax emisor, para que la secretaria del lado B sepa de dónde viene el fax. Cuando este llegue, la secretaria de B lo pasará al traductor, pero sin el número de fax. Este verá que la cabecera del mensaje que le pasa la secretaria pone que está en holandés, y por tanto deberá traducir del holandés al idioma particular del nivel 3, lado B, es decir, al francés.

Hay que destacar que en este proceso, los traductores pueden acordar utilizar cualquier otro idioma intermedio y no afectaría a los procesos de los otros niveles. Igualmente,

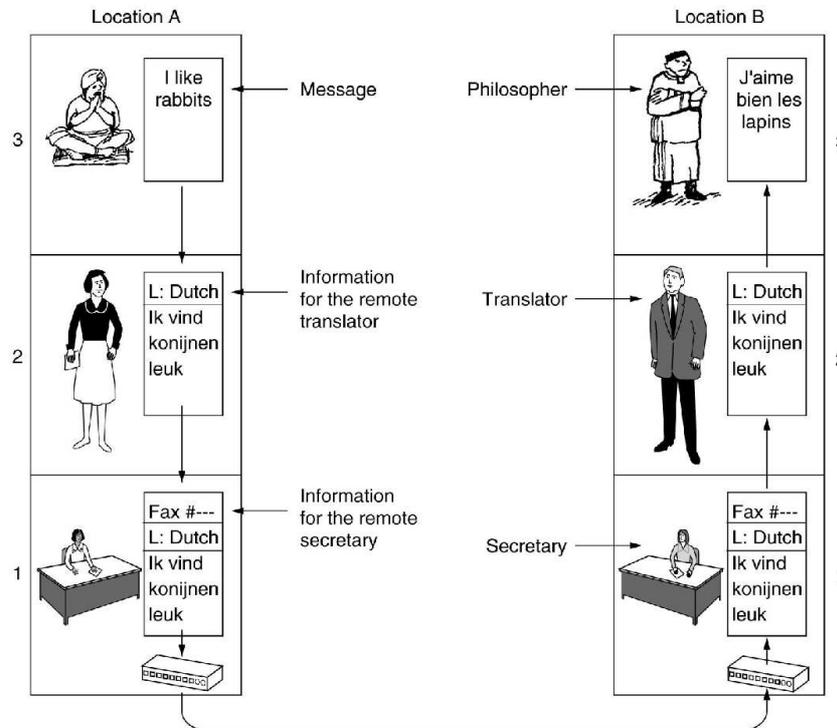


Figura 2.1: Ejemplo de la comunicación estructurada en niveles

las secretarías podrían decidir enviar los mensajes por correo electrónico o cualquier otra vía, sin que esto afectase al resto de niveles. De la misma forma, se ha estructurado la comunicación entre computadores en niveles, cada uno de los cuales está dedicado a unas funciones.

2.2. Consideraciones de diseño de la solución por niveles

Para poder desarrollar una solución estructurada en niveles, hay que tener en cuenta los siguientes factores:

1. Cada proceso que está ejecutándose en un computador debe poder establecer una conexión. Por tanto se necesita alguna forma de direccionamiento en la red que permita

identificar cada computador, y dentro de este, a cada proceso.

2. Se deben definir las reglas para la transferencia de datos. La comunicación entre dos elementos conectados entre sí puede ser:
 - **Simplex:** los datos sólo pueden circular en un sentido
 - **Half-duplex:** los datos pueden viajar en ambos sentidos pero no simultáneamente.
 - **Duplex:** los datos pueden viajar en ambos sentidos simultáneamente
3. Tanto el emisor como el receptor deben tener un mismo mecanismo para detectar y/o corregir errores en la transmisión. Además el receptor deberá tener alguna forma de poder indicar al emisor cuáles mensajes recibió y cuáles no.
4. No todos los sistemas de comunicación mantienen el orden de los mensajes. Por tanto los protocolos deben establecer un procedimiento para que el receptor pueda ordenar los mensajes que recibe.
5. El protocolo debe proteger un receptor lento de una cantidad abrumadora de datos enviados por un emisor rápido.
6. No todos los procesos pueden aceptar mensajes arbitrariamente extensos. Por ello, los protocolos deben definir mecanismos de segmentación de la información.

Todas estas consideraciones deben ser tenidas en cuenta a la hora de proponer una arquitectura para un sistema teleinformático.

3 ARQUITECTURA ISO/OSI

3.1. Las capas o niveles OSI

A partir de las consideraciones expuestas en el apartado anterior, la ISO elaboró un modelo de arquitectura dispuesto en capas o niveles. Este modelo es el que aparece en la figura 3.1, y se denominó **modelo de sistemas abiertos**, o en inglés, *open systems interconnection*, como referencia de las capas que debería tener cualquier sistema abierto. Este modelo está compuesto por las siguientes capas:

1. **Nivel físico:** Esta capa o nivel trata toda la problemática de la transmisión física por el medio de transmisión o canal correspondiente. En él se definen todos los factores físicos que atañen a la transmisión de los datos, como el tipo de conectores, niveles eléctricos, características mecánicas de los conectores, etc, según el medio físico elegido para realizar la transmisión de los datos. La unidad de datos intercambiada en este nivel es el bit.
2. **Nivel de enlace:** Este nivel utiliza el nivel inferior para proporcionar a los niveles superiores una transmisión libre de errores, fiable y sin duplicidad de la información, aunque el medio de transmisión no reúna estas características. La unidad de información intercambiada en este nivel es la *trama* o *frame*.
3. **Nivel de red:** Este nivel dirige las opciones de encaminamiento de la información por la sub-red en función del destino de la información, estado del tráfico, etc.. La unidad de información que maneja es el *paquete*.
4. **Nivel de transporte:** Su misión consiste en segmentar la información que un host envía y en unirlos de nuevo correctamente en su destino. Además gestiona la multi-

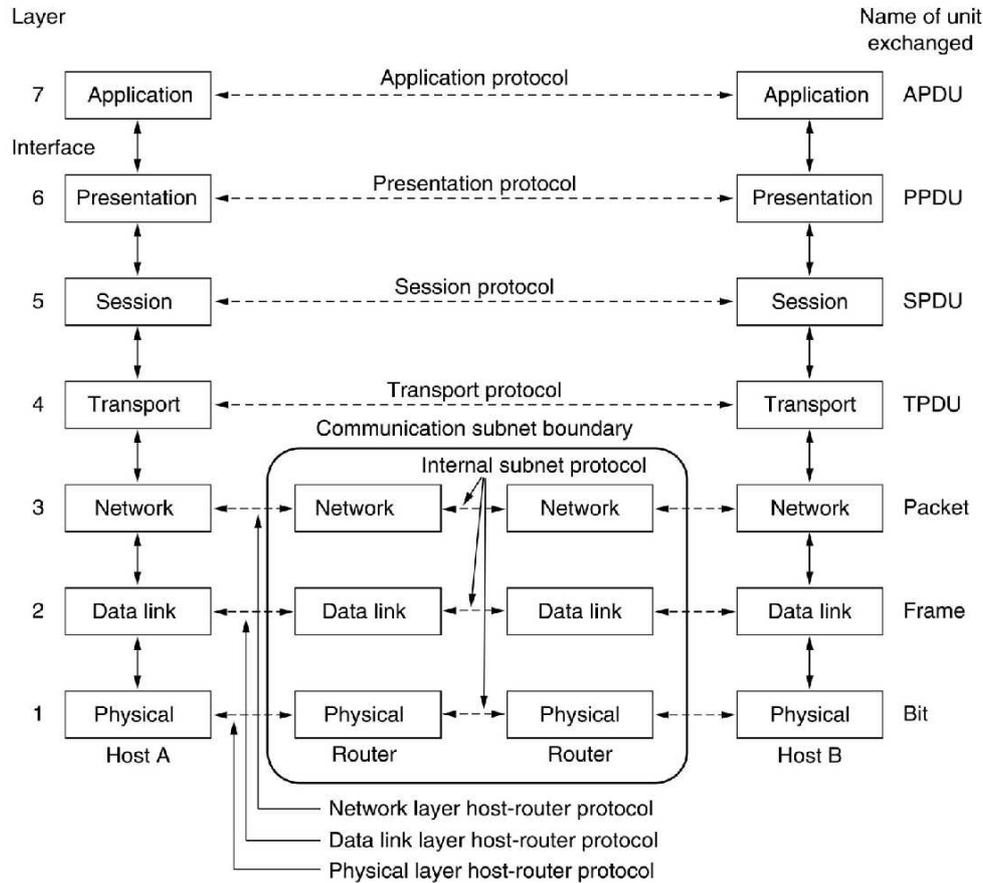


Figura 3.1: Modelo de referencia ISO/OSI

plexación de conexiones para conseguir una mayor eficiencia. Su unidad es el *TPDU* o *Transport Protocol Data Unit*

- Nivel de sesión:** Este nivel es el encargado de establecer los mecanismos para reanudar el diálogo entre los hosts a partir de un punto seguro en caso de caída del sistema o pérdida de conexión. La unidad que maneja es la *SPDU* o *Session Protocol Data Unit*
- Nivel de presentación:** Su función consiste en interpretar y procesar la información intercambiada con fines de aprovechamiento del ancho de banda y seguridad de la transmisión. (compresión de la información, criptografía, etc.). La unidad de información es el *PPDU*.

7. **Nivel de aplicación:** Este nivel es el único que no está definido, ya que lo constituyen los programas de aplicación que usan los servicios proporcionados por niveles inferiores. Como aplicaciones típicas podemos mencionar el correo electrónico, bases de datos distribuídas, ftp, etc.

3.2. Transmisión de datos en el modelo OSI

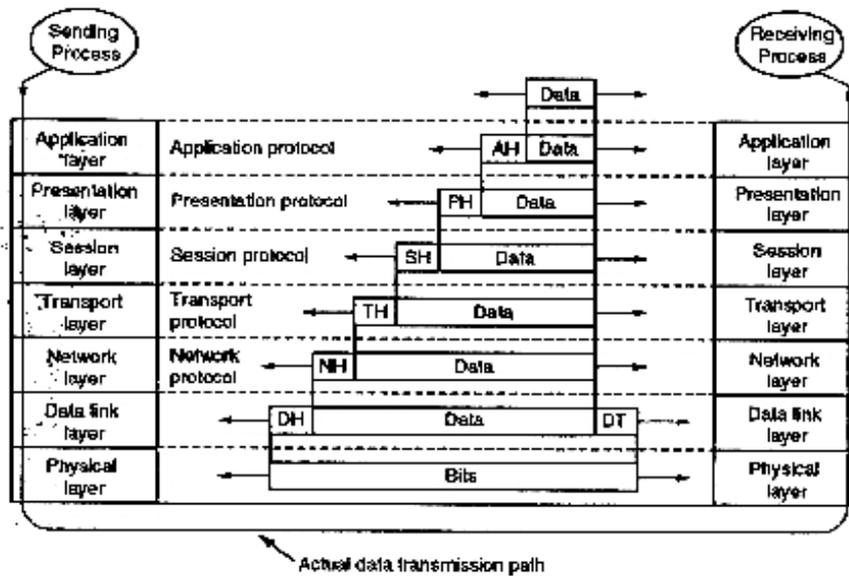


Figura 3.2: Transmisión de datos en el modelo OSI

La transmisión de datos en el modelo OSI es la que aparece reflejada en la figura 3.2. Cuando el proceso de la capa de aplicación desea enviar unos datos al proceso receptor, pasa los datos al nivel de aplicación, el cual añade su encabezado y pasa todo al nivel de presentación. De esta manera, cada nivel por el que pasan los datos añade su cabecera. Al final, por el medio físico circulan los datos iniciales con todas las cabeceras. En el host receptor, cada nivel irá extrayendo la cabecera correspondiente, de forma que al proceso receptor sólo le llegarán los datos enviados por el proceso emisor.

3.3. Modelo TCP/IP. Comparación con el modelo OSI

El modelo TCP/IP era el modelo que utilizaba la red ARPA, y como esta fué el origen de la internet, en la práctica es el más utilizado. La figure 3.3 muestra el modelo de referencia TCP/IP. En cada capa se muestran los protocolos que se encargan de realizar las funciones de cada capa, según el tipo de red o de aplicación de que se trate.

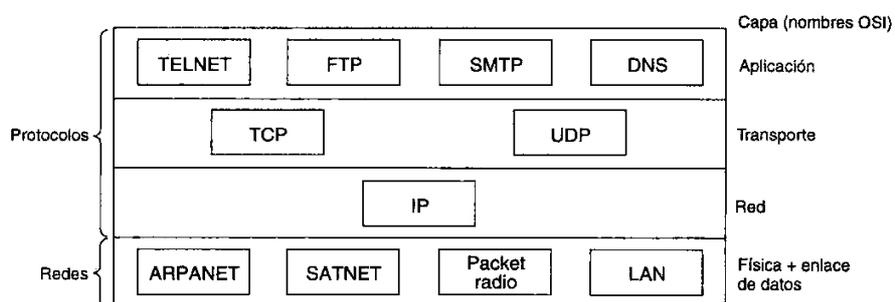


Figura 3.3: Modelo de referencia TCP/IP

A la derecha de la figura se observa la correspondencia con el modelo ISO. Como se puede observar, en este modelo no se definen capas correspondientes a la de sesión ni a la de presentación. Las funciones que desarrollan estas capas en el modelo OSI las realiza aquí la capa de aplicación.

4 SERVICIOS DE COMUNICACIÓN DE DATOS. TECNOLOGÍAS WAN

4.1. Tipos de conmutación

La infraestructura básica para construir una red de computadores puede ser de dos tipos:

- **Red privada** En este caso, toda la subred es propiedad del dueño de la red y de los hosts. Es el caso de las redes de área local, como la de la Facultad de Farmacia. Este tipo de redes se usa cuando la red no debe atravesar suelo público, o cuando las distancias entre los hosts no son muy grandes.
- **Red pública** En este caso, la subred es propiedad del operador de red y proporciona el servicio de comunicación a los hosts y terminales del cliente. Es un sistema análogo al sistema telefónico público, y con frecuencia es parte de él. Este tipo de redes suele coincidir con redes WAN, ya que es única solución cuando una red tiene que cruzar suelo público o cuando existen distancias demasiado grandes para una LAN. Como ejemplo, podemos citar la red de la Universitat. Por ejemplo, la red del campus de Burjassot está conectada mediante líneas telefónicas con los otros campus.

Cuando una red de computadores es una red pública que forma parte de la estructura del sistema telefónico (sistema que estudiaremos con detalle en el tema 4), para transmitir los datos por el sistema telefónico hay que utilizar algún método de *conmutación*, dado que el sistema telefónico se construyó a base de líneas de transmisión conectadas a conmutadores. Por otro lado, como veremos en el Tema 6 los nuevos estándares para construcción de

redes de área local se basan en conmutadores y enlaces punto a punto. Por tanto, también funcionan mediante conmutación.

La técnica de conmutación define cómo y cuándo se configura el conmutador para conectar la línea entrante con una de las líneas salientes. Para transmitir datos, las técnicas de conmutación que se pueden emplear son las siguientes:

- **Conmutación de circuitos:** Cuando una persona (o un computador mediante un módem) hace una llamada por la red telefónica convencional (llamada también *Red Telefónica Conmutada* o RTC) el sistema telefónico busca un camino físico, compuesto por líneas de transmisión y conmutadores, desde el teléfono origen al teléfono de destino. Este camino físico o circuito debe establecerse **antes** de que cualquier dato o señal de voz pueda ser transmitido (también debe enviarse un reconocimiento de vuelta desde el teléfono de destino). Sin embargo, una vez el circuito está establecido la información puede ser transmitida con el único retardo de la propagación de la propia señal, ya que todos los conmutadores de la ruta están ya configurados y conectando entre sí el origen y el destino.
- **Conmutación de Mensajes:** Cuando el emisor tiene un bloque de datos listo para ser enviado, este es enviado y almacenado sucesivamente en cada central de conmutación de la ruta que debe seguir hasta el destino. Una vez almacenado, entonces se configura el conmutador de la central para enviar el mensaje hasta la siguiente central. Esta técnica sirve sólo para datos, no para voz, y requiere que, además de un conmutador, la central disponga de recursos informáticos como disco, o memoria, para almacenar el mensaje. Esta técnica de conmutación también es conocida como **Store and Forward**. El mayor problema de esta técnica es que no existe límite en el tamaño del mensaje. Ello obliga a que los encaminadores o routers en cada central de conmutación deberían tener buffers de tamaño ilimitado. Además, un sólo mensaje muy largo podría bloquear el uso de un encaminador o conmutador durante minutos.
- **Conmutación de paquetes:** Consiste básicamente en la conmutación de mensajes, pero limitando el tamaño del mensaje. Un mensaje puede ocupar varios paquetes. Sin embargo, cada paquete es enviado por separado. Incluso pueden seguir rutas distintas. Sin embargo, al limitar el tamaño del paquete, en cada central de conmutación es seguro que todo paquete puede ser almacenado en memoria sin que esta se desborde, ya que tiene el tamaño limitado. Además, esta técnica asegura que ningún paquete podrá colapsar el encaminador más de un tiempo limitado. Por otro lado, para enviar el segundo paquete de un mensaje multipaquete no es necesario esperar el reconocimiento de que ha llegado el primero. Pueden ser enviados uno detrás de otro.

Las Figuras 4.1 y 4.2 ilustran cómo se transmite la información entre las diversas centrales de conmutación según la técnica de conmutación utilizada. No obstante, cada técnica se explica con más detalle en el tema 4.

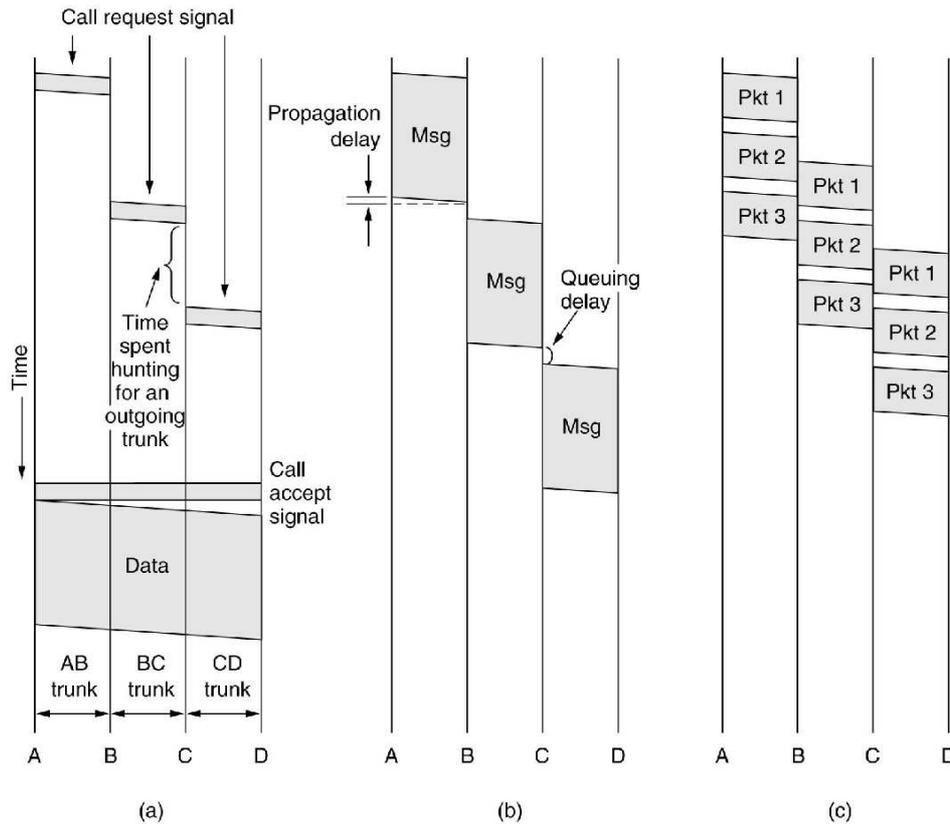


Figura 4.1: Diagrama temporal del flujo de información

4.2. Tecnologías WAN

Algunas de las tecnologías o estándares más extendidos para la transmisión de datos por el sistema telefónico (que normalmente se usa en una WAN, de ahí el título de la sección) son las siguientes:

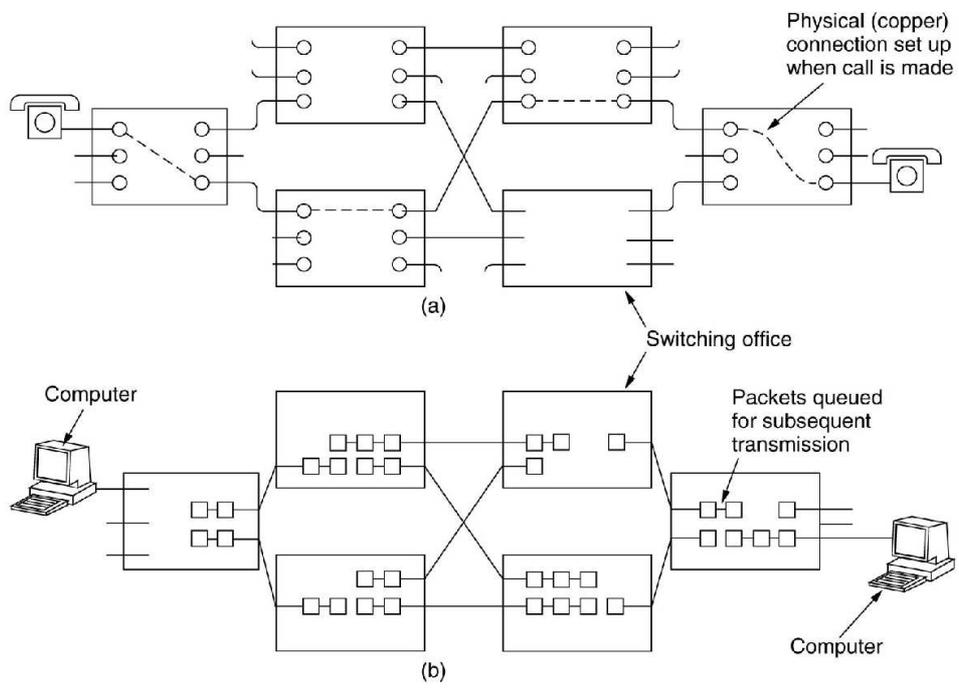


Figura 4.2: Transmisión de la información por las centrales de conmutación

4.2.1. X.25

El **X.25** es un estándar que la CCITT desarrolló en 1970 para crear una interfaz entre las redes públicas de conmutación de paquetes y sus clientes. La capa física de este interfaz, definida por la norma **X.21**, la veremos en el tema 5.

X.25 está orientado a conexión, y trabaja con *circuitos virtuales*. Un **circuito virtual conmutado** se crea cuando una computadora envía un paquete a la red y le pide a esta que se haga una llamada a una computadora remota. Una vez establecida la “conexión”, los paquetes se pueden enviar por esta conexión y siempre llegarán en orden. X.25 proporciona control de flujo para asegurar que un emisor rápido no desborde a un receptor lento.

Un **circuito virtual permanente** es como un circuito virtual conmutado, pero se establece previamente un acuerdo entre el cliente y la compañía telefónica, para que el circuito virtual esté siempre presente y no haga falta una llamada para establecerlo. Ambos circuitos se dicen virtuales porque sólo consisten en asegurar que cuando el cliente transmite un paquete, este paquete circula sólo por las computadoras de la compañía que forman el circuito. Mientras este cliente no transmita paquete, las computadoras de la compañía pueden usarse para otros circuitos o para otros clientes.

4.2.2. Frame Relay

El estándar *frame relay* es un servicio de las compañías telefónicas para mover bits de la computadora *A* a otra computadora *B* de forma orientada a conexión y a una velocidad razonable. Hace 20 años la comunicación mediante líneas telefónicas era lenta y poco fiable. Por eso, los protocolos para usar estas líneas eran complejos, para enmascarar esos errores. Lo que pasa es que las computadoras de entonces eran demasiado caras para ponerlas a hacer ese trabajo. Ahora la situación ha cambiado. Las computadoras son baratas, y las líneas telefónicas alquiladas (dedicadas) son (en teoría) rápidas, digitales y fiables. Además ahora las computadoras son baratas y mucho más rápidas. Por eso ahora se necesita un protocolo simple, donde la mayor parte del trabajo lo hacen las computadoras de los usuarios, no la red. El protocolo *frame relay* es de este tipo.

El estándar *frame relay* es como una línea virtual dedicada (alquilada). El cliente alquila un circuito virtual permanente entre dos puntos, y puede enviar tramas o *frames* de hasta 1600 bytes entre ellos. También se pueden alquilar circuitos virtuales permanentes entre un punto determinado y otros muchos puntos, y cada trama lleva un número de 10

bits que le diga cuál circuito virtual utilizar.

La diferencia entre una línea alquilada real y una virtual es que en la real el usuario puede enviar tráfico las 24 horas del día a la máxima velocidad, mientras que con la virtual se pueden enviar ráfagas de datos a toda velocidad, pero la media de utilización de la línea a largo plazo tiene que ser menor de cierto nivel. Por supuesto, la línea virtual es mucho más barata de alquilar. El frame relay compite con los circuitos virtuales permanentes de X.25, aunque opera a velocidades mucho más altas y ofrece menos funciones. Frame relay no proporciona servicios de detección de tramas dañadas o perdidas, ni de control de flujo ni acuses de recibo.

5 NIVEL FÍSICO: MODELO DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN

5.1. Descripción del modelo

En el nivel físico la unidad de información que se debe transmitir es el bit. Los niveles o capas superiores serán los encargados de agrupar los bits en unidades superiores y diferenciar los distintos tipos de información. Este nivel se ocupa únicamente de la transmisión física de la información. Para ello debe definir un **sistema de comunicación**, tal y como aparece en la figura 5.1.

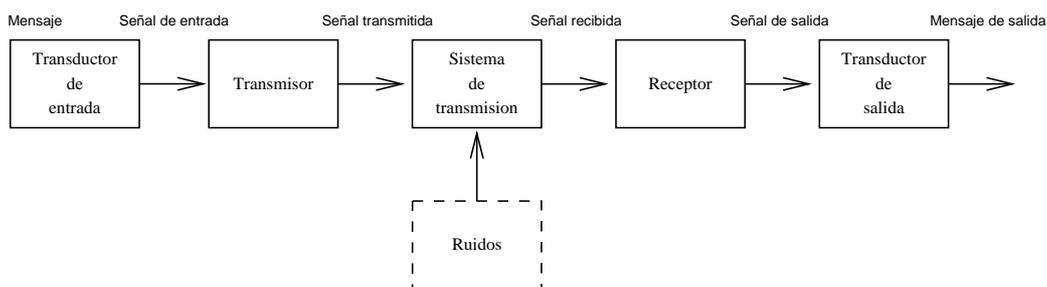


Figura 5.1: Modelo de un sistema de comunicación

Transductores de entrada-salida: Son dispositivos capaces de convertir variaciones de señales eléctricas en variaciones de cualquier otra magnitud física (temperatura, presión, señal electromagnética, etc). Estos elementos permiten que la voz humana, imágenes y cualquier otro tipo de información pueda ser procesada por circuitos electrónicos.

Transmisor: Este elemento toma la señal de entrada y la inyecta en el canal de transmisión para que sea transmitida. Normalmente para que sea transmitida eficientemente el transmisor debe procesar la señal de alguna forma, principalmente realizando una modulación de la misma.

Canal de transmisión: Es el medio físico o enlace entre el emisor y el receptor. Todos los canales de transmisión se caracterizan por imponer una atenuación a la señal transmitida.

Receptor: Es el elemento complementario del transmisor. Recoge la señal que le entrega el medio, la procesa y la entrega al transductor de salida.

Un ejemplo de un sistema de comunicación como el descrito podría ser el sistema telefónico. El mensaje de entrada serían las ondas sonoras generadas por la persona que habla. El transductor de entrada sería el altavoz del teléfono del emisor. El emisor sería el teléfono. El medio de transmisión sería el sistema telefónico. El receptor sería el teléfono de destino, y el transductor de salida el auricular del teléfono de destino. En la práctica algunos elementos de esta figura no están tan diferenciados como aparecen en la misma. Así, podríamos considerar al transductor de entrada y al emisor como un mismo aparato, es decir, un sistema transmisor.

5.2. Conceptos básicos sobre análisis de señales

5.2.1. Conceptos básicos

Para comprender el funcionamiento de los sistemas de comunicación es necesario concretar antes unos conceptos fundamentales que nos ayudan a describir cualquier tipo de señal electrónica. Cuando se estudian las comunicaciones electrónicas es necesario analizar la distribución de la potencia y la composición de las frecuencias de la señal de información. Para ello se utiliza el *análisis de señales*. Aunque todas las señales electrónicas no son ondas senoidales o cosenoidales puras, muchas lo son, y las que no lo son pueden descomponerse como una serie de funciones seno o coseno.

En esencia las señales eléctricas son variaciones de voltaje (o corriente) con respecto al tiempo. Estas señales pueden representarse por una serie de ondas seno o coseno. Estas ondas pueden estudiarse en el dominio del tiempo o en el dominio de la frecuencia.

Cuando una señal seno (o coseno) se representa en el ámbito temporal, se puede definir mediante dos conceptos:

Amplitud: Valor máximo (en valor absoluto) que alcanza la señal.

Periodo: Tiempo que tarda la señal en completar un ciclo.

Es importante señalar que podemos considerar que cualquier señal es una señal periódica, ya que las señales aperiódicas se pueden considerar como señales periódicas de periodo infinito.

Así, por ejemplo, la señal

$$v(t) = 2 \operatorname{sen}(2\pi 4t)$$

si viene expresada en voltios entonces tiene una amplitud de 2 voltios y un periodo de $1/4 = 0,25$ segundos.

Por otro lado, cuando una señal se estudia en el ámbito de la frecuencia se deben tener en cuenta los siguientes conceptos:

Toda señal periódica $v(t)$ puede descomponerse en suma de senoides de distinta frecuencia, según la fórmula de Fourier (ver capítulo 6)

$$v(t) = \frac{a_0}{T} + \frac{2}{T} \sum_{i=1}^{\infty} a_i \cos(w_i t) + b_i \operatorname{sen}(w_i t), \quad w_i = 2\pi i f \quad (5.1)$$

y se denomina **armónico de orden i** al término $a_i \cos(w_i t) + b_i \operatorname{sen}(w_i t)$.

La frecuencia del armónico de orden i viene dada por el producto $i \cdot f$, donde f se denomina **frecuencia fundamental**. Se denomina fundamental porque esta frecuencia es la que determina el periodo T de la señal v . Es decir,

$$T(v) = 1/f_f \quad (5.2)$$

Diremos que la amplitud o potencia de un armónico cualquiera será

$$A_i = \sqrt{a_i^2 + b_i^2} \quad (5.3)$$

ya que las funciones seno y coseno están desfasadas en $\pi/2$. Por otra parte, la fase del armónico de orden i será $F(i) = \arctg \frac{b_i}{a_i}$.

El término $\frac{a_0}{T}$ se denomina **componente continua** de la señal, y se calcula como el valor medio de la señal en un periodo (ver capítulo 6). El coeficiente a_0 tiene la fórmula

$$a_0 = \int_0^T f(t) dt \quad (5.4)$$

Se define un **fasor** como la representación de un armónico de orden i en forma de vector rotante en sentido contrario a las agujas del reloj, que gira velocidad angular w_i , y cuyas coordenadas cartesianas son (a_i, b_i) . La representación de un fasor i en un instante dado equivale al armónico de orden i . La figura 5.2 muestra la representación de un fasor i para un instante dado t

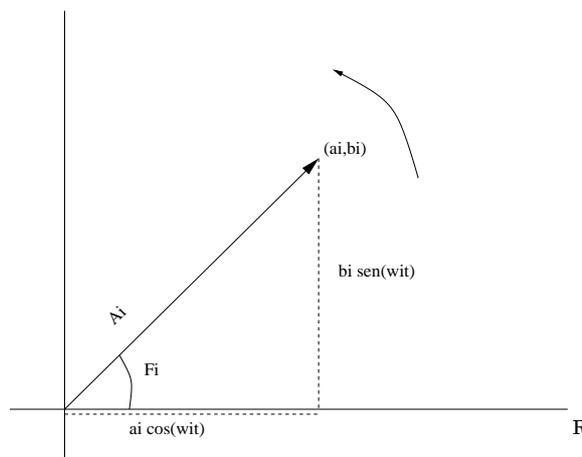


Figura 5.2: Representación de un fasor en un instante dado

En esta figura, el fasor es un vector de coordenadas (a_i, b_i) con respecto al origen de coordenadas. El módulo del fasor, será por tanto el módulo del armónico de orden i , A_i y el ángulo del fasor con respecto al eje de abscisas (la recta Real) será la fase del armónico de orden i , F_i tal y como las hemos expresado.

Adicionalmente, se puede representar un fasor o armónico de orden i no con respecto a la posición en el plano imaginario para un instante dado, sino con respecto a la frecuencia. En este caso, la representación de un armónico o fasor consiste en 2 diagramas: diagrama de amplitud y diagrama de fase. El primero consiste en poner en el eje de abscisas

la frecuencia del fasor, y en el eje de ordenadas la amplitud del mismo. El dibujo resultante es una recta vertical situada en la frecuencia del fasor y cuya altura es la amplitud del fasor. Por su parte, el diagrama de fase consiste en poner en el eje de ordenadas la fase del armónico. En este caso, el diagrama también resulta en una raya vertical ubicada en el punto del eje de abscisas correspondiente a la frecuencia del fasor, y cuya altura (positiva o negativa) corresponde con el ángulo del fasor.

Así, por ejemplo, podemos representar el fasor $4\text{sen}(2\pi 40t)$ mediante los diagramas de amplitud y de fase que aparecen en la figura 5.3

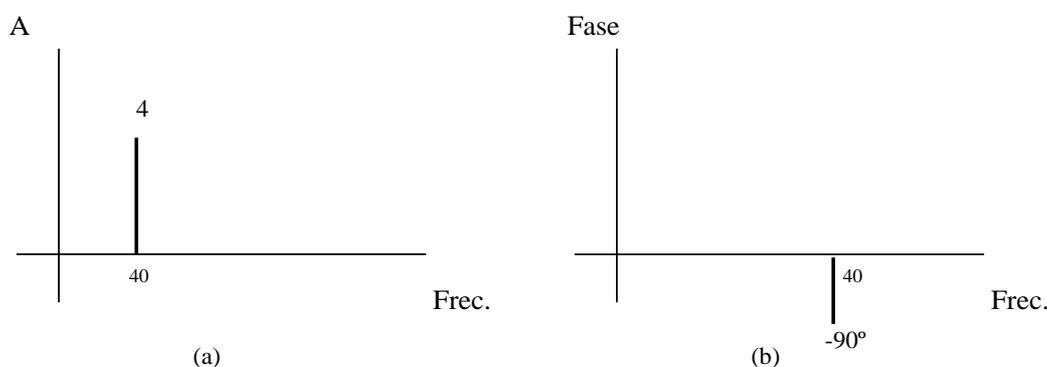


Figura 5.3: Diagrama de amplitud (a) y de fase (b) para el armónico del ejemplo.

Cuando una función $f(t)$ se puede descomponer en series de Fourier con más de un armónico, entonces se define:

Espectro de amplitud: Consiste en la representación en diagrama de amplitudes de todos los fasores que componen la función $f(t)$. Por supuesto, a cada línea vertical que representa el espectro de amplitud de una señal seno (o coseno) se le denomina **armónico**

Espectro de fase: Consiste en la representación en diagrama de fase de todos los fasores que componen la función $f(t)$.

Para representar los fasores en un espectro se siguen las siguientes convenciones:

1. La variable independiente representada en el eje de las x será la *frecuencia cíclica* f en hertzios, en lugar de la frecuencia angular ω en radianes. Cualquier frecuencia específica será identificada con un sufijo (p. ej., f_0).
2. La fase será medida con respecto a ondas *coseno*. De esta forma, las ondas seno deberán ser convertidas a ondas coseno mediante la identidad

$$\sin(\omega t) = \cos(\omega t - 90^\circ)$$

3. **Las amplitudes siempre son positivas.** Si aparecen signos negativos, estos se trasladarán al espectro de fase mediante la ecuación

$$-A \cos(\omega t) = A \cos(\omega t \pm 180^\circ)$$

No importa si se toma $+180^\circ$ ó -180° , ya que en el diagrama de fase ambos valores indican el mismo punto.

4. El diagrama o espectro de fase está expresado en grados.

De esta forma, antes de representar el espectro de amplitud y/o fase de una señal, deberemos hacer las transformaciones pertinentes para expresar dicha señal según estas 4 reglas. Vamos a ver un par de ejemplos que nos aclararán el uso de estas reglas o convenciones:

Ejemplo 1: Representar el espectro de amplitud y de fase de la señal

$$x(t) = 6 \cos(2\pi 15t) + 2 \cos(2\pi 45t + 90^\circ)$$

La señal $x(t)$ está ya descompuesta en dos señales expresadas como coseno y con amplitud positiva. Por tanto ya cumple las 4 reglas para representar fasores. Por tanto, la representación gráfica del espectro de amplitud y fase de esta señal es la que aparece en la figura 5.4

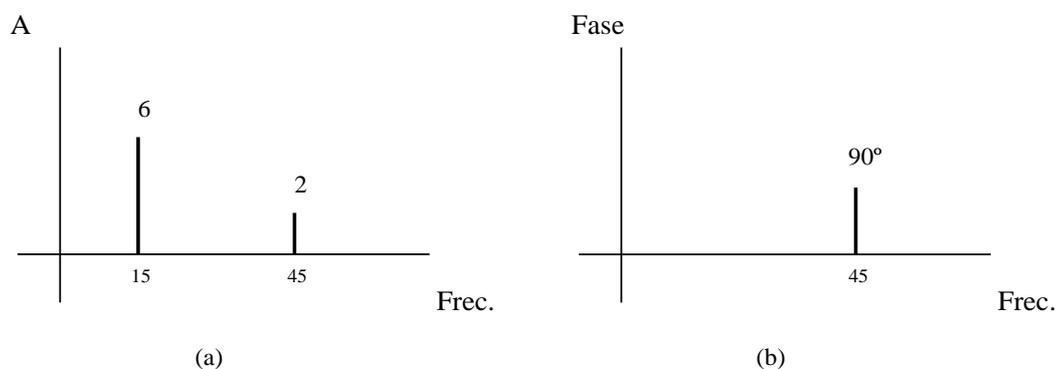


Figura 5.4: Representación gráfica del espectro (a) de amplitud y (b) de fase

Ejemplo 2: Representar el espectro de amplitud y de fase de la señal

$$x(t) = -3 + 6 \operatorname{sen}(30 \pi t)$$

En este caso sí hay que realizar transformaciones. La primera es expresar la señal como suma o diferencia de senos o cosenos:

$$x(t) = -3 \cos(2 \pi 0 t) + 6 \operatorname{sen}(30 \pi t)$$

A continuación aplicamos la segunda regla:

$$x(t) = -3 \cos(2 \pi 0 t) + 6 \cos(2 \pi 15 t - 90^\circ)$$

Finalmente, aplicamos la tercera regla:

$$x(t) = 3 \cos(2 \pi 0 t - 180^\circ) + 6 \cos(2 \pi 15 t - 90^\circ)$$

Con este resultado, el espectro de frecuencias y de fase es el que aparece en la figura 5.5

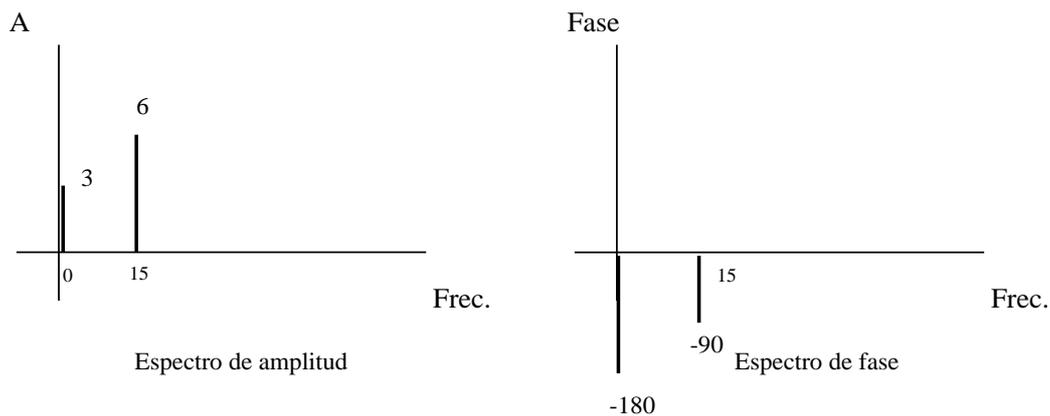


Figura 5.5: Representación en amplitud y fase de la señal modificada

En el espectro de amplitudes la **frecuencia fundamental** representa la mínima separación que puede haber entre 2 armónicos cualesquiera. Por tanto, a mayor frecuencia

fundamental, mayor rango de frecuencias ocuparán los armónicos de una señal, ya que tendrán que estar más separados.

También es de destacar que el número de armónicos en el espectro de amplitudes de una señal **NO** tiene nada que ver con el orden de los armónicos que aparecen. Así, en el ejemplo 1 aparecen 2 armónicos en el espectro, pero el orden del segundo armónico que aparece en el espectro (el situado en frecuencia 45 Hz) es orden 3. Lo que ocurre es que el armónico de orden 2 no aparece en el espectro (Tiene amplitud 0).

En general, la frecuencia fundamental de una señal se puede calcular a partir de un espectro de amplitudes como el máximo común divisor de las frecuencias que aparecen en el espectro. También es de destacar que la frecuencia fundamental puede no tener un armónico en el espectro de amplitudes de una señal.

Como ya hemos comentado, cualquier onda o función periódica se puede descomponer en **Serie de Fourier**. Una serie de Fourier es de la forma

$$f(t) = a_0 + a_1 \cos \alpha_1 + a_2 \cos \alpha_2 + \dots + a_n \cos \alpha_n + b_1 \sen \beta_1 + \dots + b_n \sen \beta_n \quad (5.5)$$

en donde $\alpha_i = \beta_i = 2\pi i f t$, $\forall i \in [1..n]$

o también se puede expresar el espectro de una señal como (ver apéndice 6)

$$f(t) = 1/T \sum_{i=-\infty}^{\infty} c_i e^{(j\omega_i t)} \begin{cases} c_i = (a_i - jb_i) \\ c_i = \int_0^T f(t) \cos(\omega_i t) dt + j \int_0^T f(t) \sen(\omega_i t) dt \\ = \int_0^T f(t) e^{(-j\omega_i t)} dt \end{cases} \quad (5.6)$$

Es decir, las ecuaciones 5.5 y 5.6 son equivalentes. Al espectro de amplitudes obtenido de la fórmula 5.1 se le denomina **espectro unilateral** de amplitudes, mientras que al espectro de amplitudes obtenido de la fórmula 5.6 se le denomina **espectro bilateral** de amplitudes. Este último no tiene sentido físico (aparecen armónicos en frecuencias negativas, que no existen en la realidad). Los armónicos negativos aparecen por la descomposición del coseno (o seno) en la suma de 2 exponenciales complejas. Sólo tienen sentido matemático. La correspondencia entre el espectro bilateral y el unilateral es que el bilateral es completamente simétrico con respecto al eje de ordenadas, y las amplitudes están divididas por 2 (ver teorema de Euler) con respecto al espectro bilateral.

Otro concepto fundamental en el estudio en frecuencias de una señal es el **ancho de banda**, denotado como **B**. El ancho de banda de una señal se define como el rango de frecuencias que ocupa la señal en el espectro de amplitudes. Dicho de otra forma, el ancho de banda de una señal es el ancho del espectro de amplitudes de dicha señal (de ahí su nombre).

El ancho de banda es un concepto que también se aplica a los canales o medios de transmisión. En este caso, el ancho de banda de un canal se define como el rango de frecuencias en las que los armónicos no sufren atenuación al ser transmitidos desde el extremo emisor hasta el extremo receptor del canal.

De estas definiciones anteriores se deduce que para que la transmisión de una señal por un canal de transmisión se lleve a cabo correctamente, **se debe cumplir siempre que**

$$B_{\text{senal}} \subseteq B_{\text{canal}} \quad (5.7)$$

En general podemos decir que el ancho de banda de una señal coincide con la frecuencia más alta que aparece en el espectro de dicha señal. Es decir,

$$B = f_{\text{max}} \quad (5.8)$$

Sin embargo, en ciertas ocasiones no se cumple lo anterior. Como veremos en el tema siguiente, cuando la una señal es producto de ciertos tipos de modulación, entonces su ancho de banda se puede calcular como la resta de la mayor menos la menor de las frecuencias que aparecen en el espectro de la señal. Es decir, $B = f_{\text{max}} - f_{\text{min}}$.

En resumen, a menos que se trate de señales moduladas de cierta forma, el ancho de banda de una señal se calculará como la frecuencia máxima de la señal. Así, en el primer ejemplo el ancho de banda de la señal es de 45 hertzios, mientras que en el segundo ejemplo es de 15 hertzios.

El ancho de banda se puede establecer también conociendo la frecuencia fundamental y conociendo **el orden** del armónico de mayor frecuencia. Si el de mayor frecuencia es el armónico de orden i , entonces

$$B = f_{\text{max}} = i \times f_f \quad (5.9)$$

Se denomina **componente continua (dc)** a la amplitud del armónico de frecuencia 0.

5.2.2. Ancho de banda y velocidad de transmisión

Velocidad de transmisión: Es el número de bits que se transmiten en un segundo.

Hay que señalar que **la velocidad de transmisión es una característica exclusiva de las señales digitales**, que son las únicas que se pueden expresar en bits. Y las señales digitales tienen forma cuadrada, ya que sólo pueden tomar 2 niveles de tensión.

Resulta que la descomposición en series de Fourier de una señal cuadrada resulta en la suma de un número infinito de armónicos.

Sin embargo, aunque una onda puede tener un ancho de banda muy grande, incluso infinito, cualquier medio de transmisión que se utilice para transmitir una señal podrá transmitir sólo un ancho de banda limitado. Ello se debe a que cualquier sistema eléctrico o electrónico contiene elementos de almacenamiento de energía (inductancias y capacitancias). La cantidad de energía almacenada no puede cambiar instantáneamente, de ahí que todo sistema de comunicación permita sólo un ancho de banda finito. Por ello una forma de caracterizar los medios de transmisión es definir su ancho de banda B_{canal} .

Pues bien, la máxima velocidad de transmisión con la que se puede transmitir una señal por un determinado medio o canal de comunicación depende del ancho de banda del canal. ¿Como están relacionadas ambas magnitudes?.

Sea una señal digital $s(t)$. Por tanto, $s(t)$ será una señal cuadrada pura de periodo T , donde el nivel alto es un "1" lógico y el nivel bajo un "0" lógico, tal como se muestra en la figura 5.6.

Como ya hemos comentado, el periodo de la señal es el inverso de la frecuencia fundamental de dicha señal. Es decir, $T = 1/f_f$. Por otro lado, en el peor de los casos, la variación más rápida (la mayor frecuencia) de una señal digital se da cuando esta sigue el patrón 10101010..., repitiendo con ello el patrón de la señal 5.6. Pero en esta señal un bit dura $T/2$. Por otro lado, la velocidad de transmisión v_T se define como $1/T_{BIT}$. Por tanto,

$$v_T = \frac{1}{T_{BIT}} = \frac{1}{T/2} = 2 \frac{1}{T} = 2 f_f \quad (5.10)$$

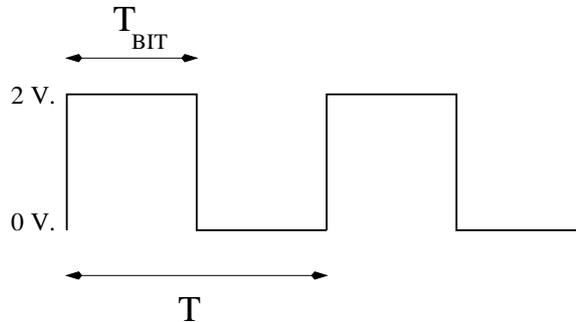


Figura 5.6: Señal cuadrada de periodo T

Es decir, como máximo la velocidad de transmisión de la señal será $v = 2f_f$ bits por segundo. Efectivamente, si consideramos que la señal cuadrada (cuya descomposición en Series de Fourier nos dice que tiene infinitos armónicos) tiene sólo 1 armónico (el primero de la serie, es decir, la frecuencia fundamental) entonces $v = 2f_f$

Esta es una cota superior que nos dice, para un ancho de banda dado de un canal, cuál podrá ser, como máximo, la velocidad de transmisión que podrá alcanzar una señal digital sin que su espectro sea deformado al ser transmitida por dicho canal. Pero **esto dependerá de con cuántos armónicos aproximemos la señal cuadrada, es decir, cuán perfectamente cuadrada sea la señal**. Para aclararlo, vamos a ver un ejemplo. También se puede consultar el artículo [4] de la bibliografía, disponible en la página web de la asignatura.

Sea que queremos transmitir $s(t)$ por un canal cuyo ancho de banda es de 4 MHz. Vamos a calcular la velocidad a la que podemos transmitir $s(t)$. Para ello el ancho de banda de la señal que transmitamos no debe exceder el ancho de banda del canal, cumpliendo con la ecuación 5.7. Sin embargo, si aplicamos el análisis de Fourier a la señal $s(t)$ obtenemos la expresión

$$s(t) = 1 + A \sum_{k=1, k \text{ impar}}^{\infty} 1/k \text{ sen}(2\pi(k f_f t)) \quad (5.11)$$

Esta expresión indica que toda señal cuadrada $s(t)$ tiene infinitos armónicos, tal como indica el límite superior del sumatorio. Es decir, un ancho de banda infinito. Para solucionar el problema y que la señal pueda cumplir con la ecuación 5.7 tenemos que cambiar el ∞ del sumatorio por un número fijo y finito de armónicos. Ello se traducirá en que la señal cuadrada perfecta de la figura 5.6 dejará de serlo, aunque se parecerá a una

señal cuadrada.

Efectivamente, los armónicos de mayor frecuencia también serán los de menor amplitud, ya que en ecuación 5.11 cada término del sumatorio (cada armónico) va multiplicado por $1/k$. Tomemos por ejemplo la señal $s(t)$ aproximada por los tres primeros armónicos, es decir, sustituyendo $\infty = 3$ y $A = 1$. Por tanto, queda

$$s(t) = 1 + \text{sen}(2\pi f_f t) + 1/3 \text{sen}(2\pi 3f_f t) \quad (5.12)$$

La figura 5.7 muestra esta señal en el tiempo y su espectro de amplitud, compuesto por tres armónicos. Como se puede apreciar, ya no es una señal cuadrada perfecta, pero se le parece algo. A cambio, su espectro se ha reducido de tener un ancho de banda ilimitado a tener un ancho de banda compuesto por sólo tres armónicos.

Esta señal sí tiene un ancho de banda finito, y debe cumplirse que el ancho de banda del canal sea igual o superior al de la señal para que esta pueda ser transmitida fielmente. Por tanto, en el peor de los casos se debe cumplir que

$$3f_f = 4\text{MHz} \Rightarrow f_f = 4\text{MHz}/3 = 1,3333\text{MHz} \quad (5.13)$$

Por tanto, f_f podrá valer como máximo 1.3333 MHz, y por tanto la velocidad de transmisión v podrá ser como máximo $v = 2f_f = 2.66666$ Mbps para la aproximación de $s(t)$ con sólo tres armónicos. Por supuesto, si aproximamos la señal con un número distinto de armónicos, entonces la frecuencia fundamental máxima (que determina la velocidad de transmisión máxima) cambiará.

La fórmula 5.10 es una cota superior porque en ella estamos aproximando una señal cuadrada, cuyo espectro está compuesto por un número de armónicos infinito, por una señal compuesta de un sólo armónico (su frecuencia fundamental). Tal suposición convierte a la señal cuadrada en una señal seno.

Como ejercicio se propone hallar la velocidad máxima de transmisión si la señal cuadrada $s(t)$ se aproximara por una señal compuesta por 5 armónicos.

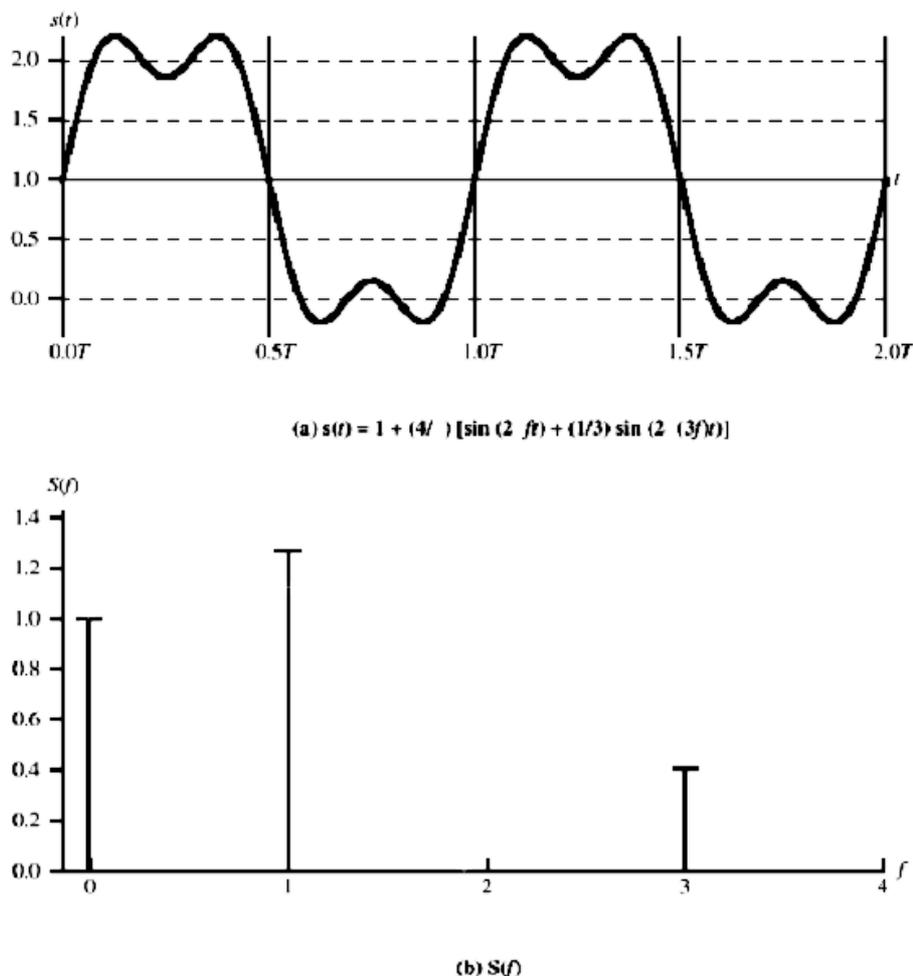


Figura 5.7: Señal $s(t)$ aproximada por los 2 primeros armónicos

5.2.3. Potencia de una señal

Un parámetro importante en cualquier sistema de transmisión es la fuerza o potencia de la señal transmitida. Cuando una señal se propaga por un medio de transmisión siempre sufre una **atenuación** o pérdida de potencia.

Los niveles de potencia de una señal, sí como su ganancia o pérdida, se expresan en **decibelios (dB)**, en honor a Alexander Graham Bell, inventor del teléfono. El decibelio es una medida relativa, y se define como

$$\text{Decibelio} = 10 \log_{10} P_1/P_2 \text{ dB} \quad (5.14)$$

Cuando hablamos de pérdidas o ganancias de potencia, nos estamos refiriendo al signo de la expresión. Así, una ganancia de -3 dB equivale a decir una atenuación de 3 dB. No olvidemos que el decibelio es una medida relativa.

Las ventajas de utilizar el decibelio como medida para expresar potencias se pueden resumir en dos:

1. La potencia de las señales suele variar de forma logarítmica, con lo que esta medida las expresa mejor.
2. Las ganancias y pérdidas a lo largo de una ruta de transmisión se pueden calcular como una simple suma o resta de ganancias.

Por otro lado, cuando hablamos de magnitudes eléctricas la potencia se puede expresar como

$$P = V^2/R \quad (5.15)$$

Por tanto, si dos potencias están medidas sobre la misma impedancia resistiva la expresión del decibelio quedaría como

$$\text{Decibelio} = 10 \log_{10} P_1/P_2 = \log_{10} (V_1^2/R) / (V_2^2/R) = 20 \log_{10} V_1/V_2 \quad (5.16)$$

Para poder calcular o expresar ganancias absolutas en decibelios, se transforma la magnitud relativa del decibelio en una magnitud absoluta refiriéndolo siempre a una magnitud fija. Así, se habla del **decibelio-Watio (dBW)** como la potencia referida a la potencia de 1 watio.

$$\text{Potencia(dBW)} = 10 \log_{10} (\text{Potencia(W)}/1W) \quad (5.17)$$

También se define el **decibelio-miliVoltio** como la potencia absoluta referida a 1 mV y a una impedancia determinada

$$Potencia(dBmV) = 20 \log_{10} (Voltaje(mV)/1mV) \quad (5.18)$$

Esta magnitud se define, si no es específica lo contrario, sobre una impedancia de 75 Ohmios.

Teorema de Parseval

El teorema de Parseval nos relaciona la potencia de una señal con el espectro de amplitudes de la misma. En resumen viene a decir que la potencia media de una señal se puede obtener a partir de su espectro. La fórmula general para hallar la potencia media disipada por una señal periódica $x(t)$ en una resistencia de 1Ω es

$$\bar{P} = \int_0^T |x(t)|^2 dt \quad (5.19)$$

Pues a partir de esta expresión el Teorema de Parseval nos dice que la potencia media se puede expresar con la siguiente ecuación:

$$\bar{P} = \sum_{i=-\infty}^{\infty} |c_i|^2 \quad (5.20)$$

Es decir, el valor de cada armónico del espectro de amplitud al cuadrado nos da la potencia contenida en ese armónico. esto quiere decir que a partir del espectro de amplitud de una señal podemos obtener información acerca de su potencia.

5.3. Problemática del sistema de comunicación

En todo sistema de comunicación aparecen ciertos problemas que dificultan la correcta recepción del mensaje en su destino. Estos problemas son los siguientes:

Atenuación Como ya hemos comentado, todo medio físico de transmisión se caracteriza por atenuar la señal que circula por él.

Distorsión de atenuación La atenuación no afecta por igual a todas las frecuencias, con lo que los armónicos que componen una señal pueden verse atenuados en distinta proporción según su frecuencia.

Distorsión de retardo En un medio guiado la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas varía con la frecuencia.

Ruido El ruido se define como una señal que se introduce en el medio de transmisión (ver figura 5.1) y se añade a la señal transmitida debido a cualquier causa, ya sea esta externa o interna al sistema de comunicación. Se pueden nombrar varios tipos de ruido:

Ruido térmico Se debe a la agitación de los electrones en un conductor cuando aumenta la temperatura en este. Está presente en todos los dispositivos electrónicos y medios de transmisión, y se distribuye uniformemente en todo el espectro.

Ruido de intermodulación El envío de señales de espectros cercanos puede producir energía a frecuencias que sean suma, diferencia o múltiplo de dichas frecuencias, pudiendo afectar a señales que se transmitan en esa banda.

Ruido de acoplamiento o *crosstalk* Cuando transcurren paralelos dos o más conductores se puede producir una inducción electromagnética entre ellos, y a su vez esta producir corrientes que afecten a la señal original.

Ruido impulsional Este tipo de ruido consiste en picos irregulares que generalmente son de corta duración y amplitud relativamente grande. Normalmente se deben a perturbaciones ajenas al sistema (rayos, picos de tensión en la red eléctrica, máquinas muy potentes en las cercanías, etc.).

6 ANÁLISIS DE FOURIER

6.1. Series de Fourier

6.1.1. Expresión trigonométrica de las Series de Fourier

Jean Fourier, matemático del siglo XIX, llegó a demostrar que toda función periódica de frecuencia f puede descomponerse en una suma de senos y cosenos de frecuencia múltiplo de f . A este sumatorio se le denomina **descomposición en series de Fourier**. A los senos y cosenos se les denomina **funciones armónicas**, y la frecuencia f se le denomina **frecuencia fundamental**.

Así, dada una **señal periódica** $f(t)$ con una potencia media finita y con un periodo T , entonces $f(t)$ puede descomponerse como sigue

$$f(t) = \frac{a_0}{T} + \frac{2}{T} \sum_{i=1}^{\infty} a_i \cos(w_i t) + b_i \operatorname{sen}(w_i t), \quad w_i = 2\pi i f \quad (6.1)$$

Llamaremos **armónico de orden n** al término $a_i \cos(w_i t) + b_i \operatorname{sen}(w_i t)$. Por ello, diremos que la amplitud o potencia de un armónico cualquiera será

$$P_i = \sqrt{a_i^2 + b_i^2} \quad (6.2)$$

ya que las funciones seno y coseno están desfasadas en $\pi/2$.

Definimos también a_0/T como la **componente continua de la señal** $f(t)$, y corresponde con el armónico de orden 0.

Resumiendo, podemos decir que una función periódica en el tiempo se puede descomponer en una serie de componentes armónicos, finita o infinita, donde cada armónico se caracteriza por su frecuencia y su amplitud o potencia. Además, la frecuencia del armónico n -ésimo se situará en la frecuencia $n \times f_0$, siendo f_0 la frecuencia de la señal $f(t)$, que llamaremos **frecuencia fundamental**.

El espectro de amplitudes de una función consiste en representar en el eje de abscisas el rango de frecuencias, y en el eje de ordenadas el valor de las amplitudes de cada componente armónico. El espectro unilateral es el basado en esta **expresión trigonométrica de las series de Fourier**. Es importante destacar que el espectro de amplitudes generado por esta expresión va desde el armónico 1 hasta el infinito. Por ello se le llama el espectro unilateral, ya que solo contiene frecuencias positivas.

Operando a partir de la fórmula 6.1, se llegan a las fórmulas para obtener los valores de a_i y b_i :

$$a_0 = \int_0^T f(t) dt \quad (6.3)$$

$$a_i = \int_0^T f(t) \cos(w_i t) dt \quad (6.4)$$

$$b_i = \int_0^T f(t) \sen(w_i t) dt \quad (6.5)$$

6.1.2. Expresión compleja de las fórmulas de Fourier

Las fórmulas de Fourier también pueden expresarse como una integral de variable compleja. Partiendo de la ecuación 6.1,

$$f(t) = \frac{a_0}{T} + \frac{2}{T} \sum_{i=1}^{\infty} a_i \cos(w_i t) + b_i \sen(w_i t)$$

y sustituyendo en ella las fórmulas de Euler

$$\cos(w_i t) = \frac{e^{jw_i t} + e^{-jw_i t}}{2} \quad (6.6)$$

$$\text{sen}(w_i t) = \frac{e^{jw_i t} - e^{-jw_i t}}{2j} \quad (6.7)$$

tenemos que

$$f(t) = \frac{a_0}{T} + \frac{2}{T} \sum_{i=1}^{\infty} a_i \frac{e^{jw_i t} + e^{-jw_i t}}{2} + b_i \frac{e^{jw_i t} - e^{-jw_i t}}{2} \quad (6.8)$$

Simplificando y multiplicando, tenemos que

$$f(t) = \frac{a_0}{T} + \frac{1}{T} \sum_{i=1}^{\infty} (a_i - b_i j) e^{jw_i t} + (a_i + b_i j) e^{-jw_i t} \quad (6.9)$$

Si llamamos $C_i = (a_i - b_i j)$ y llamamos a su conjugado $C_i^* = (a_i + b_i j)$, entonces obtenemos la expresión

$$f(t) = \frac{a_0}{T} + \frac{1}{T} \sum_{i=1}^{\infty} (C_i e^{jw_i t} + C_i^* e^{-jw_i t}) = \frac{1}{T} \sum_{i=-\infty}^{\infty} C_i e^{jw_i t} \quad (6.10)$$

Expresión que determina la **forma compleja de las series de Fourier**, y donde el valor de C_i viene dado por su definición. Efectivamente, sustituyendo las fórmulas 6.4 y 6.5 en la fórmula $C_i = (a_i - b_i j)$ tenemos que

$$C_i = \int_0^T f(t) \cos(w_i t) dt - j \int_0^T f(t) \text{sen}(w_i t) dt \quad (6.11)$$

y unificando ambas integrales llegamos a que

$$C_i = \int_0^T f(t) e^{(-jw_i t)} dt \quad (6.12)$$

La forma compleja de las series de Fourier tiene la ventaja de que es más compacta y simple que la trigonométrica. Lo que ocurre es que esta descomposición produce lo que se denomina el **espectro bilateral** de amplitudes. Efectivamente, vemos que en la ecuación 6.10 el sumatorio va desde $-\infty$ a $+\infty$. Es decir, esta expresión nos da unas amplitudes de los armónicos de valor C_i , pero tiene también armónicos en frecuencias negativas. Más aún, ¿Describen el mismo espectro la forma trigonométrica y la forma compleja de

las series de Fourier?. La respuesta es la siguiente: dado que C_i es un número complejo ($C_i = (a_i - b_i j)$), podemos expresar C_i como

$$C_i = |C_i| e^{j\phi_i} \quad (6.13)$$

donde el módulo de C_i (es decir, la amplitud del armónico C_i) es $|C_i| = \sqrt{(a_i^2 + b_i^2)}$ y donde su fase es $\phi_i = \arctan \frac{-b_i}{a_i}$. Sustituyendo la ecuación 6.13 en la ecuación 6.10, esta última queda

$$f(t) = \frac{1}{T} \sum_{i=-\infty}^{\infty} |C_i| e^{j\phi_i} e^{jw_i t} = \frac{1}{T} \sum_{i=-\infty}^{\infty} |C_i| e^{j(\phi_i + w_i t)} \quad (6.14)$$

Desarrollando el sumatorio para los términos positivos y negativos tenemos que

$$f(t) = \frac{C_0}{T} + \frac{1}{T} \sum_{i=1}^{\infty} |C_i| e^{j(\phi_i + w_i t)} + e^{-j(\phi_i + w_i t)} \quad (6.15)$$

Sustituyendo la suma de exponenciales opuestas por un coseno, tenemos que

$$f(t) = \frac{C_0}{T} + \frac{2}{T} \sum_{i=1}^{\infty} |C_i| \cos(w_i t + \phi_i) \quad (6.16)$$

Si comparamos esta fórmula con la fórmula 6.1, vemos que ambas coinciden, expresando la función periódica $f(t)$ como una suma de señales cosenoidales (el seno es una cosenoidal desfasada) Además, las amplitudes de cada armónico coinciden en ambas fórmulas. Por tanto, ambas formas expresan la misma ecuación. Lo que ocurre es que la forma trigonométrica tiene sentido físico real (frecuencias sólo positivas, maneja el coseno) y la compleja no (maneja las exponenciales complejas en las que se puede dividir un coseno).

De esta forma, cuando desarrollamos la forma compleja de las series de Fourier (la fórmula 6.10), obtendremos un espectro de amplitudes bilateral, en donde tendremos un semieje negativo de abscisas. El espectro de amplitudes bilateral tendrá en el semieje positivo un espectro de idéntica forma al espectro unilateral, pero todas las amplitudes serán la mitad que en el unilateral (el sumatorio en la forma compleja está multiplicado por el término $\frac{1}{T}$, mientras que en la trigonométrica está multiplicado por $\frac{2}{T}$). Además el espectro bilateral tendrá repetido el espectro del semieje positivo en el semieje negativo, resultando ambos en una imagen especular con el eje de simetría en el eje ordenadas. Por

ello, al transformar la forma compleja en una forma real (fórmula 6.16) las amplitudes de los espectros de ambos semiejes se suman, resultando en el espectro unilateral.

6.2. Transformada de Fourier

La descomposición en serie de Fourier sólo es aplicable a señales periódicas. Sin embargo, la mayoría de las señales que se transmiten en los sistemas de comunicación son aperiódicas. Para modelar estas señales está la **Transformada de Fourier**

La transformada de Fourier parte de la suposición de que toda señal no periódica puede considerarse como una señal periódica cuyo periodo tiende a infinito. En ese caso si el periodo T tiende a infinito, entonces la frecuencia f tiende a cero, por lo que la separación entre armónicos tiende a cero, resultando en un espectro de frecuencias continuo. No tenemos un conjunto discreto de armónicos, sino espectro de amplitudes continuo.

Matemáticamente, partimos de la forma compleja de las series de Fourier

$$f(t) = \frac{1}{T} \sum_{i=-\infty}^{\infty} C_i e^{jw_i t}$$

donde $\Delta w = \frac{2\pi}{T}$

De ambas expresiones podemos deducir que

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \sum_{i=-\infty}^{\infty} C_i e^{jw_i t} \Delta w \quad (6.17)$$

Pero cuando $\Delta w \rightarrow 0$ entonces el sumatorio infinito se convierte en una integral de Riemann, donde C_i se define para todas las frecuencias, y no sólo para múltiplos de $\frac{2\pi}{T}$. Por tanto, cuando $T \rightarrow 0$, $w_i \rightarrow w$, y C_i se transforma en una función continua que denotaremos como $F(w)$, cuyo valor viene dado por la fórmula

$$F(w) = \lim_{T \rightarrow \infty} C_i = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-jw t} dt \quad (6.18)$$

La expresión de $f(t)$ será

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{i=-\infty}^{\infty} F(w) e^{j\omega t} dw \quad (6.19)$$

6.2.1. Propiedades de la transformada de Fourier

1. Si la escala de tiempos se reduce en un factor $1/\tau$, entonces la escala de frecuencia se ve aumentada en τ . Es decir,

Si

$$f(t) \longleftrightarrow F(w)$$

entonces

$$f(t) \longleftrightarrow \tau F(w)$$

Efectivamente, si cambiamos t por t/τ entonces

$$F(w) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t/\tau) e^{-j\omega t} dt$$

Si realizamos el cambio de variable $x = t/\tau$, entonces $t = \tau x$ y $dt = \tau dx$, resultando en que

$$F(w) = \int_{-\infty}^{\infty} \tau f(x) e^{-j\omega \tau x} dx = \tau F(w\tau)$$

2. Si $f(t) = f(-t)$ entonces $F(w) = F(-w)$, y además si $f(t) = -f(-t)$ entonces $F(w) = -F(-w)$

3. **Transformada de Fourier de una derivada:**

Si

$$f(t) \longleftrightarrow F(w)$$

entonces

$$\frac{d f(t)}{dt} \longleftrightarrow j w F(w)$$

Ya que

$$\begin{aligned}\frac{d f(t)}{d t} &= \frac{d}{d t} \left(\frac{1}{2 \pi} \int_{i=-\infty}^{\infty} F(w) e^{j w t} d w \right) = \\ &= j w \frac{1}{2 \pi} \int_{i=-\infty}^{\infty} F(w) e^{j w t} d w = j w F(w)\end{aligned}$$

4. Teorema del desplazamiento en la frecuencia:

Si

$$f(t) \longleftrightarrow F(w)$$

entonces

$$f(t) e^{j w_0 t} \longleftrightarrow F(w - w_0)$$

Para demostrarlo, veamos lo que resulta de sustituir $F(w)$ por $F(w - w_0)$ en la fórmula de $f(t)$ y aplicar un cambio de variable¹:

$$\begin{aligned}& \frac{1}{2 \pi} \int_{i=-\infty}^{\infty} F(w - w_0) e^{j w t} d w = \\ &= \frac{1}{2 \pi} \int_{i=-\infty}^{\infty} F(x) e^{j t(w_0 + x)} d x = \\ &= \frac{1}{2 \pi} e^{j w_0 t} \int_{i=-\infty}^{\infty} F(x) e^{j t x} d x = e^{j w_0 t} f(t)\end{aligned}$$

De esta forma, desplazar la transformada de una función temporal en la frecuencia equivale a multiplicar la función por $e^{j w_0 t}$.

5. Teorema del desplazamiento en el tiempo:

Este es el teorema complementario del anterior, y dice que

Si

$$f(t) \longleftrightarrow F(w)$$

entonces

$$f(t - t_0) \longleftrightarrow e^{j w t_0} F(w)$$

¹ $x = w - w_0; w = x + w_0; d w = d x$

De la misma forma que en el teorema anterior, para probar el teorema sustituiremos en este caso $f(t)$ por $f(t - t_0)$ en la fórmula de $F(w)$ y realizaremos un cambio de variable²:

$$\begin{aligned} & \int_{-\infty}^{\infty} f(t - t_0) e^{-j\omega t} dt = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-j\omega(x+t_0)} dx = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-j\omega x} e^{-j\omega t_0} dx = \\ &= e^{-j\omega t_0} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-j\omega x} dx = e^{-j\omega t_0} F(\omega) \end{aligned}$$

² $x = t - t_0; t = x + t_0; dt = dx$

7 EJERCICIOS

1. Hallar la **transformada de Fourier** de un pulso cuadrado de amplitud A y anchura τ centrado en el eje de ordenadas.
2. Hallar la velocidad máxima de transmisión de la señal cuadrada aproximada por la señal $x(t) = \text{sen}(2\pi f_1 t) + 1/3 \text{sen}(2\pi 3f_1 t)$ si se utiliza un canal de 8 MHz de ancho de banda.
3. Dada la señal $x(t) = 12 + 15 \cos(200\pi t) + 20 \cos(300\pi t) - 5 \cos(400\pi t) - 12 \text{sen}(500\pi t)$, se pide:
 - Dibujar su espectro y hallar su ancho de banda B
 - Hallar la frecuencia fundamental y el número de armónicos que componen la señal.
 - Expresar el B en número de armónicos
 - Hallar la velocidad máxima de transmisión por un canal de
 - $B = 2$ kHz
 - $B = 4$ kHz
 - $B = 500$ Hz
4. Se desea transmitir de forma continua el caracter ASCII 'E' (01000101) por un canal de transmisión con un ancho de banda $B = 200$ Hz. Si la señal se transmite a 125 bps., calcular:
 - El número de armónicos que pasarán por el canal sin sufrir atenuación
 - El ancho de banda necesario para transmitir los primeros 50 armónicos de la señal.

- La componente continua de la señal
5. Dibujar el espectro de amplitud y de fase de la señal $s(t) = \cos(2\pi 1200 t) + 7 \sin(2\pi 600 t) - 8 \cos(2\pi 400 t)$ Hallar el ancho de banda, la frecuencia fundamental y el orden del armónico de mayor frecuencia que aparece en la señal. Hallar la potencia media de la señal
 6. Demostrar las propiedades del desplazamiento en el tiempo y del desplazamiento en frecuencia de la Transformada de Fourier que aparecen en la sección 6.2 de este tema.
 7. Se desea transmitir una señal $f(t)$ diente de sierra de amplitud $A=4$ V. y de periodo $T = 2$ mseg. por un canal cuyo ancho de banda es de 6 kHz. Hallar el valor máximo de N para que $f(t)$ no sufra atenuación. (Septiembre 2002)

$$f(t) = \sum_{i=1}^N \frac{2A}{\pi} (-1)^{i+1} \sin(2\pi i f_f t) \quad (7.1)$$

8. ¿Cuál es la capa del modelo ISO/OSI encargada de segmentar la información que un host envía y de unirlos de nuevo correctamente en el host de destino? (Parcial Febrero 2002)
9. ¿Cuáles de las técnicas de conmutación empleadas en las redes almacenan la información en los diversos nodos intermedios que esta va atravesando? (Parcial Febrero 2002)
10. Dado un tren de 9 bits que se repite indefinidamente en el tiempo con el patrón 101101011 y con una velocidad de transmisión de 500 bps, ¿Cuál es la frecuencia del armónico de orden 8? (Parcial Febrero 2002)
11. Una señal diente de sierra, cuya descomposición en series de Fourier se muestra en la fórmula que aparece en la ecuación 7.1 debe transmitirse por un canal cuyo ancho de banda es de 3,2 kHz. Si la señal diente de sierra tiene un periodo de 2 mseg., ¿Cuántos armónicos de la señal podrán transmitirse por el canal sin sufrir atenuación? (Final Junio 2005)

Bibliografía

- [1] Bruce A. Carlson, “*Communication Systems*”, Ed. McGraw-Hill, 3^a ed., 1986.
- [2] .C. Castro Lechtaler, R. J. Fusario,, “Teleinformática para Ingenieros en Sistemas de Información” Ed. Reverté, 2a. ed, 1999
- [3] Leon W. Couch II, “*Sistemas de Comunicación Digitales y Analógicos*”, Ed. Prentice Hall, 5^a ed., 1998. ISBN 970-17-0210-7.
- [4] Roger L. Freeman, “*Bits, Symbols, Bauds and Bandwidth*”, IEEE COmmunications Magazine. April 1998.
- [5] William Stallings, “*Comunicaciones y redes de computadores*”, Ed. Prentice Hall, 7^a ed., 2004.
- [6] Andrew S. Tanenbaum, “*Redes de Computadores*”, Ed. Prentice Hall, 4^a ed., 2003.
- [7] Wayne Tomasi, “*Sistemas electrónicos de comunicaciones*”, Ed. Prentice Hall, 2^a ed., 1997.