INSTITUTO TECNOLOGICO DE MERIDA

CARRERA:

INGENIERIA EN SISTEMAS COMPUTACIONALES

SEMESTRE:

QUINTO

ASIGNATURA:

FUNDAMENTOS DE TELECOMUNICACIONES

CLAVE:

AEC-1034

MAESTRO:

M.C. DAKAR FERNANDO VILLAFAÑA GAMBOA

dakarvillafana@hotmail.com

FUNDAMENTOS DE TELECOMUNICACIONES

OBJETIVO:

Analizar los componentes y la funcionalidad de diferentes sistemas de comunicación para evaluar las tecnologías utilizadas actualmente como parte de la solución de un proyecto de conectividad.

TEMARIO:

UNIDAD 1.-

1.- Sistemas de comunicación.

1.1.- Impacto de las Telecomunicaciones

1.2.- Componentes: Emisor, receptor, medios, códigos y protocolos.

1.3.- Señales y su clasificación: Analógicas, digitales, eléctricas y ópticas.

1.4.- Análisis matemático de señales: Análisis de Fourier.

2.- Medios de transmisión y sus características.

2.1.- Guiados: Par trenzado, coaxial y fibra óptica.

2.2.- No guiados: Radiofrecuencia, microondas, satélite e infrarrojo.

2.3.- Métodos para la detección y corrección de errores:

Verificación de redundancia vertical (VRC),

Verificación de redundancia longitudinal (LRC) y

Verificación de redundancia cíclica (CRC).

2.4.- Control de flujo: Tipos: asentimiento, ventanas deslizantes. Por hardware o software, de lazo abierto o cerrado.

Laboratorio: Implementación de un circuito para un oscilador (transmisor) de Radio Frecuencia. (40 pts)

UNIDAD 2.-

3.- Modulación.

3.1.- Técnicas de modulación analógica: Modulación en amplitud (AM) y modulación en frecuencia (FM).

3.2.- Técnicas de modulación digital:

Modulación por desplazamiento de amplitud (ASK),

Modulación por desplazamiento de Frecuencia (FSK),

Modulación por desplazamiento de fase (PSK) y

Modulación de amplitud en cuadratura (QAM).

3.3.- Conversión analógico – digital: Muestreo, cuantización y codificación.

3.4.- Códigos de línea: RZ, NRZ, NRZ-L, AMI, pseudo-ternaria, Manchester, Manchester diferencial, B8ZS, HDB3, entre otros.

3.5.- Modem: estándares y protocolos.

4.- Técnicas de conmutación.

4.1.- Circuitos: Red telefónica pública. (POTS)

4.2. - Paquetes: X.25, Frame Relay

4.3. - Mensajes: Store and Forward

4.4. - Celdas: ATM

Laboratorio: Implementación de un circuito para un convertidor de Analógico a Digital (40 pts)

UNIDAD 3.-

5.- Multiplexación.

5.1.- TDM División de tiempo

5.2.- FDM División de frecuencia

5.3.- WDM División de longitud

5.4.- CDM División de código

6.- Dispositivos de comunicación.

6.1.- Características funcionales

6.2.- Interfaces

6.3.- Protocolos y estándares

6.4.- Mecanismos de detección y corrección de Errores

Laboratorio: Implementación de un medio de comunicación entre dos computadoras (40 pts)

FUENTES DE INFORMACIÓN:

1.- Andrew Tanenbaum., *Redes de Computadoras*, Cuarta Edición. Ed. Pearson/Prentice-Hall, México. 2003. ISBN 9789702601623

2. Raya, José Luis, Laura Raya, Miguel A. Martinez. *Redes locales, instalación y configuración básicas*. Primera edición. Editorial Alfaomega Ra-Ma. Octubre 2008. ISBN 978-970-15-1433-7

3.- Forouzan, Behrouz. *Transmisión de Datos y Redes de Comunicaciones.* Cuarta Ed. Mc Graw Hill. 2007. ISBN 844815617x

4.- Olifer, Natalia, Redes de Computadoras. Primera Edición. Mc.Graw-Hill 2009. ISBN 9701072499

5.- Huidobro, José Manuel; Millán, Ramón; Roldán, David. *Tecnologías de telecomunicaciones,* Coedición: Alfaomega. 2006. ISBN 970-15-1205-7

6.- Huidobro, José Manuel. *Manual de telecomunicaciones.* Coedición: Alfaomega, Ra-Ma. 2004. ISBN 970-15-0983-8

7.- Cócera Rueda, Julián. *Seguridad en las instalaciones de telecomunicación e informática.* Paraninfo. ISBN: 8497323122 ISBN-13: 9788497323123. 2004.

8.- Kontorovich Mazover, Valeri. *Fundamentos de comunicaciones digitales.* ISBN: 9786070500770. Primera Edición. 2009.

9.- Artés Rodríguez, Antonio. *Comunicaciones digitales.* Primera Edición. Pearson-PHH, 2007, ISBN: 9788483223482.

10.- Anttalainen, Tarmo, *Introduction to telecommunications network engineering*, Second Edition, Artech House telecommunications library, 2003, ISBN: 1-58053-500-3

UNIDAD 1

1.- Sistemas de comunicación.

1.1.- Impacto de las Telecomunicaciones:

Cuando nos comunicamos, estamos compartiendo información. Esta compartición puede ser local o remota. Entre los individuos, las comunicaciones locales se producen habitualmente cara a cara, mientras que las comunicaciones remotas tienen lugar a través de la distancia. El término **telecomunicaciones**, que incluye telefonía, telegrafía y televisión, significa comunicación a distancia (*tele* significa lejos en griego).

La Unión Internacional de Telecomunicaciones, organismo dependiente de las Naciones Unidas, declaró el 17 de mayo como el Día Mundial de las Telecomunicaciones debido a la importancia que las telecomunicaciones tienen hoy día en nuestra sociedad, no sólo por el avance vertiginoso que esta disciplina ha tenido, sino también por la importancia que reviste en el contexto económico y social.

A pesar del avance y penetración de las telecomunicaciones, aún falta mucho por hacer para que los beneficios de las telecomunicaciones lleguen a todos los rincones del mundo. Según estimaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones, sólo de 20 a 25% de la población mundial goza de los beneficios de las telecomunicaciones, dada la digitalización en todos los campos del saber y de la vida diaria.

La incorporación de la digitalización y la Internet a las telecomunicaciones crearon la disciplina conocida como Telemática en donde el concepto de “Redes y Movilidad” juegan un papel preponderante y están afectando los mercados, aplicaciones tecnológicas y los aspectos reguladores y normativos actuales.

La infraestructura, como herramienta de la actividad económica, genera importantes condiciones para que se incremente la productividad, reduciendo tiempo y esfuerzo en la realización de actividades y procesos. La relación que existe entre la infraestructura de un país en telecomunicaciones, electricidad, carreteras pavimentadas y agua con su nivel de ingreso, resulta evidente cuando se observa la experiencia de un gran número de países. Estos aspectos colaboran en cierta medida a eliminar la pobreza en esos países, ya que la disponibilidad de infraestructura ha aumentado el desarrollo económico de varios países.

Al mejorar la calidad de la infraestructura de las telecomunicaciones, las industrias de un país pueden reducir sus costos de transacción, realizar sus negocios y los procesos productivos con más rapidez y, en general, ahorrar tiempo y recursos que hubieran gastado con comunicaciones menos eficientes. Todo esto redunda en mejores y mayores salarios y más empleos en el sector.

La inversión en telecomunicaciones ha probado ser efectiva en la reducción de los costos de producción de varias industrias, siendo el efecto mayor y más sensible en aquellos países en donde tal infraestructura no era suficiente.

En el caso de los servicios es interesante la reducción de costos en los servicios financieros y en el comercio y hoteles. Este resultado muestra la trascendental importancia del desarrollo de las telecomunicaciones para el crecimiento económico de un país subdesarrollado.

Los países, tanto desarrollados como subdesarrollados, han empezado a darse cuenta del impacto que las telecomunicaciones tienen sobre el desempeño de sus sectores productivos. Así, se comprende hoy en día que un buen sector de telecomunicaciones genera efectos positivos a otros, tanto para las empresas como para los consumidores, pues los costos de producción y de transacción son más bajos en la medida en que las comunicaciones son más eficientes. De esta manera, no en vano para varios países, tales como Hong Kong, Corea, Singapur, Taiwán, México, Suecia, Irlanda, Chile, etc, la inversión y el uso de las telecomunicaciones forma parte de una estrategia global de competencia para construir una posición de gran competitividad en los campos de la industria, el comercio y los servicios.

En resumen, de este análisis se desprenden algunas conclusiones importantes para la economía. Primero, aquellos países cuya mejoría en la infraestructura de telecomunicaciones sea relativamente baja, necesariamente padecerán tasas de crecimiento de sus sectores industriales y de servicios relativamente bajas. Segundo, si se desea un crecimiento y un mayor dinamismo en los negocios, es fundamental la implementación de facilidades en las telecomunicaciones, ya que de esta forma, se pueden transmitir los datos que se necesitan a velocidades muchos mayores. Tercero, el acceso a las telecomunicaciones mejora la estructura de las organizaciones y de las empresas, volviéndolas más dinámicas e incrementando su capacidad gerencial, tanto en los sistemas públicos como en los privados. Los agentes que hacen uso de una comunicación más efectiva responden con mayor facilidad y rapidez a los mercados, pudiendo extender el acceso a los bienes y servicios a nivel global.

La condición actual del mundo, de desigualdad porque aún falta mucho por hacer para que los beneficios de las telecomunicaciones lleguen a todos los rincones del mundo, nos lleva a recordar y tener consciente la importancia de las telecomunicaciones y de su papel trascendental en el desarrollo sustentable.

Recientemente, el desarrollo de la microelectrónica, la digitalización y las redes de transmisión a altas velocidades están produciendo una revolución tecnológica de grandes proporciones a nivel mundial. Los conmutadores electrónicos y los sistema inteligentes han reducido su precio y, por tanto, han proliferado por todas partes. Hoy el negocio de las telecomunicaciones se ha transformado en una red de redes, un sistema nervioso entrelazado de medios inalámbricos, satélites, cable de cobre coaxial y fibra óptica. Este dinamismo propio del sector se refleja en el crecimiento exponencial de Internet, lo que genera sustanciales innovaciones, muchas de las cuales eran inimaginables. En la actualidad, el crecimiento de los usuarios del servicio de Internet sobrepasa ampliamente el crecimiento de servicios tales como la telefonía celular y la telefonía básica.

Las telecomunicaciones se han convertido en una de las actividades más dinámicas alrededor del mundo. Esto se debe a que, en la última década, los medios que se utilizaban para llevar a cabo las comunicaciones han aumentado la capacidad para enviar información por más de un millón de veces. La evolución tecnológica ha transformado la industria de las telecomunicaciones y, por tanto, será la regulación de este importante mercado en cada país es la que marcará la velocidad de esta transformación en cada uno de ellos.

1.2.- Componentes de un sistema de comunicación.

En los sistemas de información basados en computadoras, los datos se representan con unidades de información binaria (o bits) producidos en forma de ceros y unos. Por lo tanto, en la transmisión de datos se intercambia información en forma de unos y ceros entre dos dispositivos a través de alguna forma de medio de transmisión (como un cable).

La transmisión de datos se considera local si los dispositivos de comunicación están en el mismo edificio o en un área geográfica restringida, y se considera remota si los dispositivos están separados por una distancia considerable. Para que la transmisión de datos sea posible, los dispositivos de comunicación deben ser parte de un sistema de comunicación formado por *hardware y software*.

Un sistema de transmisión de datos está formado por cinco componentes:

1. **Mensaje ó Código:** Es la información (datos) a comunicar. Puede estar formado por texto, números, gráficos, sonido, video o cualquier combinación de los anteriores. Esta información es una organización de símbolos (código) que representan una palabra o una acción.
2. **Emisor**: Es el dispositivo que envía los datos del mensaje. Puede ser una computadora, una estación de trabajo, un teléfono, una videocámara, etc.
3. **Receptor**: Es el dispositivo que recibe los datos el mensaje. Puede ser una computadora, una estación de trabajo, un teléfono, una videocámara, etc.
4. **Medio**: El medio de transmisión es el camino guiado (físico) ó no guiado (invisible) por el cual viaja el mensaje del emisor al receptor. Este medio puede estar formado por una cable de cobre trenzado, un cable coaxial, un cable de fibra óptica, un láser u ondas de radio electromagnéticas (señales de microondas terrestres o satelitales).
5. **Protocolo**: Es un conjunto de reglas que gobiernan la transmisión de datos. Representa un acuerdo entre los dispositivos que se comunican. Sin un protocolo, dos dispositivos pueden estar conectados pero no comunicarse, igual que una persona que hable francés no puede ser comprendida por una que sólo hable japonés.

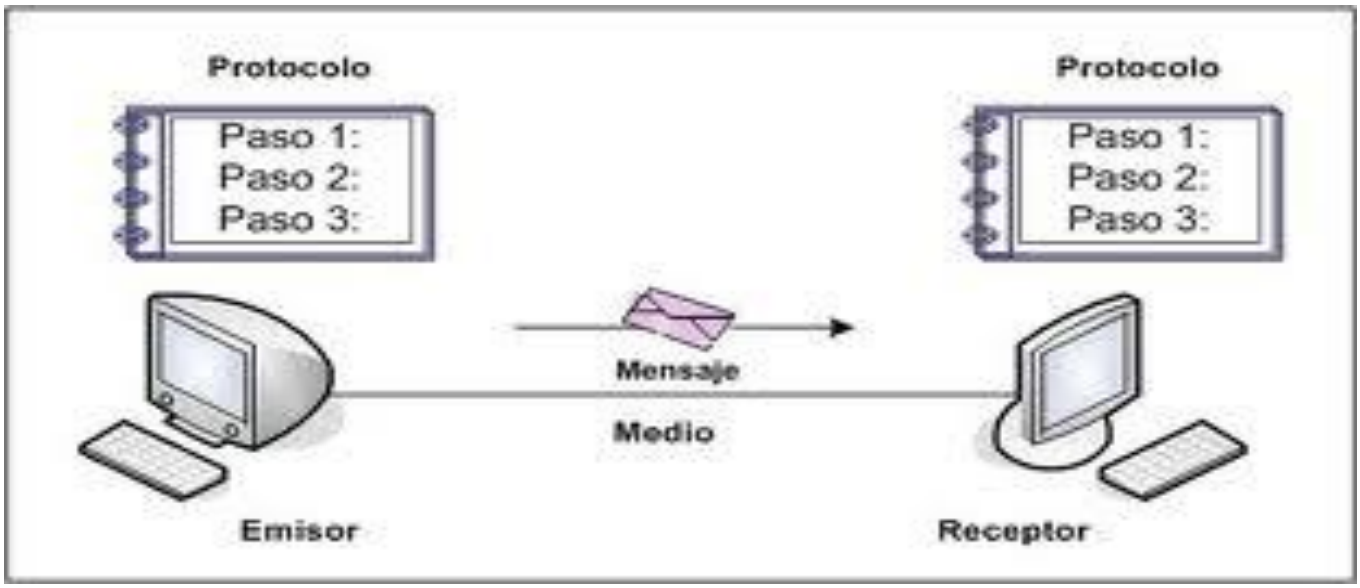


Figura 1.1 *Componentes de un sistema de transmisión de datos.*

Cuando dos o más personas se comunican emplean un conjunto de recursos para hacer que la transferencia de información sea exitosa. Para empezar, estas personas están de acuerdo en la forma en que van a hacer llegar la información de uno al otro. Se puede usar el lenguaje hablado o escrito, puede ser mediante señas, mímica o alguna otra técnica que permita codificar el mensaje que queremos hacer llegar, por ejemplo puntos y rayas (como el morse), señales con banderas (como los scouts) o como los antepasados, mediante señales de humo, tambores o palomas mensajeras. Hoy en día, estas formas de comunicación han quedado superadas por la comunicación eléctrica. Esto se debe a que se pueden transmitir las señales eléctricas a distancias mayores (teóricamente a cualquier distancia en el universo) y con velocidad sumamente alta (300,000 kilómetros por segundo aproximadamente). La comunicación puede ser mediante señales ópticas, eléctricas ó electromagnéticas.

De todos los métodos de comunicación mencionados, los tres métodos básicos son: en papel, en persona y electrónico. Algunos tipos de comunicación son combinaciones de los tres métodos. Un ejemplo del pasado es el Fax. El Fax es un equipo capaz de transmitir imágenes de documentos en papel sobre la línea telefónica y reproducirlas en un lugar distante.

Actualmente, la mayor parte del proceso se puede hacer en forma electrónica al escribir directo a la computadora, transmitirlo y almacenarlo en otra computadora para ahí revisarlo directamente. La impresión viene a ser un paso opcional.

La información se origina en una fuente y se hace llegar a su destinatario por medio de un mensaje a través de un canal de comunicación; el destinatario generalmente se encuentra en un punto geográfico distante, o por lo menos, separado de la fuente. La distancia entre fuente y destinatario puede variar desde pocos centímetros (al hablar frente a frente a un volumen normal) hasta cientos y aun miles de kilómetros (como es el caso de transmisiones telefónicas intercontinentales o de transmisiones desde y hacia naves espaciales).

Esto constituye precisamente el problema central de las telecomunicaciones, ya que al haber una fuente que genera información en un punto y un destinatario en otro punto geográfico distante del primero
Cualquiera que sea la forma de comunicación, los elementos que la conforman son casi los mismos. En la figura 1.2 se muestra un diagrama a bloques del modelo básico de un sistema de telecomunicaciones, donde se muestran los principales componentes que permiten la comunicación.

Este diagrama contiene:

1) Una fuente de información,
2) Un transmisor de información cuya función consiste en depositar la información proveniente de la fuente en un canal de comunicaciones,
3) Un medio de comunicación, a través del cual se hace llegar la información de la fuente al destino,
4) Un receptor que realiza las funciones inversas del transmisor, es decir, extrae la información del canal y la entrega al destinatario, y
5) Un destinatario que recibe y procesa la información.

En la misma figura se puede ver un ejemplo de los componentes de un sistema de telecomunicaciones.

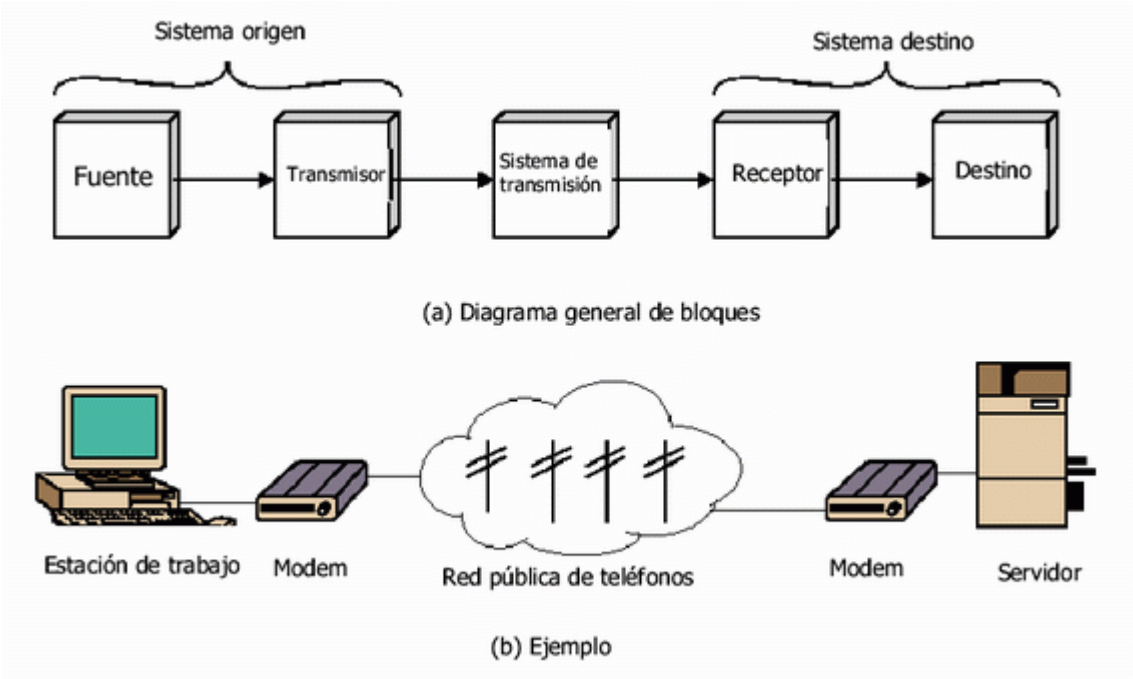


Figura 1.2.- *Ejemplo de un sistema de telecomunicaciones.*

En el diagrama a bloques se ilustra los elementos físicos de un sistema simple de telecomunicaciones de un solo sentido (Comunicación **Simplex**). Generalmente la comunicación se requiere en ambos sentidos o sea debe ser bidireccional (Comunicación **Dúplex**). En este caso, el sistema debe incluir un transmisor y un receptor en cada extremo de la conexión.

Un mensaje se usa para hacer llegar la información de la fuente al destino, y no es lo mismo un mensaje que la información que éste contiene.

Considérese el siguiente ejemplo: Una persona (A) desea enviar cierta cantidad de dinero por medio de un depósito bancario a otra persona (B). En este caso, A es la fuente, B el destinatario. La *información* es aquello necesario para conocer la cantidad de dinero y para originar la entrega del mismo a B (monto del depósito y ficha bancaria), y el *mensaje* es el conjunto de palabras o símbolos (código) bancarios necesarios (número de cuenta e identificación), para que B conozca la intención de A, y para que B pueda disponer del dinero que A le envía.

1.3.- Las señales y sus clasificaciones.

Una señal son ondas electromagnéticas (rango de frecuencias) propagadas a través de un medio de transmisión. Uno de los aspectos fundamentales del nivel físico es transmitir información en forma de señales electromagnéticas a través de un medio de transmisión. La información puede ser voz, imagen, datos numéricos, caracteres o código, cualquier mensaje que sea legible y tenga significado para el usuario destino, tanto si es humano como si es una máquina.
Generalmente, la información que utiliza una persona o una aplicación no está en un formato que se pueda transmitir por la red. Por ejemplo, no se puede sintetizar una fotografía, insertarla en un cable y transmitirla de una ciudad a otra. Sin embargo, se puede transmitir una descripción

codificada de la fotografía. Esta codificación son unos y ceros que incluso no pueden ser enviados a través de los enlaces de una red. Antes deberán ser convertidos en un formato aceptable para el medio de transmisión. Por lo tanto, el flujo de datos de unos y ceros debe ser convertido a energía en forma de señales electromagnéticas.

Una señal es una función de una variable en el tiempo, que conduce la información. Para cada instante de tiempo (variable independiente) existe un valor único de la función (variable dependiente). La función (o señal) puede ser real o compleja, sin embargo el tiempo siempre tendrá un valor real. Podemos encontrar variaciones, o sea señales, de presión, humedad, luz, calor, energía, velocidad, caudal, concentración, etc.. Toda señal lleva consigo (o transporta desde un emisor hasta un receptor) cierta cantidad de información**.**

Para la electrónica: "la señal se define como una cantidad física que varia con el tiempo, el espacio o cualquier variable o variables independientes". Así, desde el punto de vista matemático una función es una señal. Por ello, en términos generales, la descripción de una señal se da a través de una función; por ejemplo:

$$f(x) = 4x$$
$$f(x,y)= 4x + 3y$$

Habitualmente las señales se ilustran imprimiéndolas sobre un par de ejes perpendiculares. El eje vertical representa el valor, la fuerza o la potencia de la señal, que puede representar Volts, Watts o Amperes. El eje horizontal representa el paso del tiempo generalmente representado en segundos. El método a utilizar para representar la señal depende del tipo de señal. Por lo tanto, podemos distinguir diferentes clases de señales.

Tanto los datos como las señales que los representan pueden estar en forma *analógica o digital*. **Analógico** indica algo que es continuo, un conjunto de puntos específicos de datos y todos los puntos posibles entre ellos. **Digital** indica algo que es discreto, un conjunto de puntos específicos de datos sin los puntos intermedios.

Un ejemplo de una señal **analógica** es la voz humana. Cuando alguien habla, se crea una onda continua en el aire. Esta onda puede ser capturada por un micrófono y convertida en una señal analógica.

Un ejemplo de una señal **digital** son los datos almacenados en la memoria de una computadora en forma de unos y ceros. Se suelen convertir a señales digitales cuando se transfieren de una posición a otra dentro o fuera de la computadora.

Asi, las señales pueden ser continuas ó discretas, esta clasificación se puede establecer, después de saber si el eje del tiempo (eje de las abscisas) es discreto o continuo (figura 1.3).

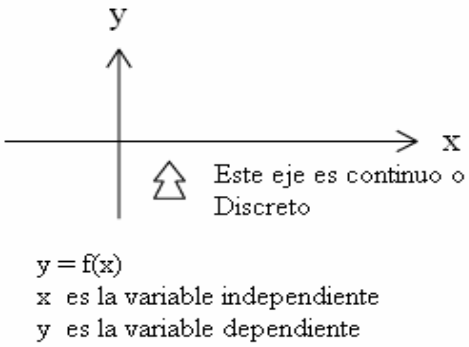


Figura 1.3.- *Eje del tiempo.*

Las señales de tiempo continuo ó periódico son aquellas cuya variable independiente (**x**) es continua y, por tanto, está definida para un conjunto continuo de valores de dicha variable. Dicho de otro modo, una señal es periódica si completa un patrón dentro de un marco de tiempo medible, denominado un **período**, y repite ese patrón en períodos idénticos subsecuentes. Cuando se completa un patrón completo, se dice que se ha completado un **ciclo**.

Las señales de tiempo discreto ó aperiódica poseen solo definición para una sucesión discreta de valores; esto es, su variable independiente pertenece al conjunto de los números enteros y la señal nada mas tendrá valores en los espacios que tienen una separación igual y son creados en el eje del tiempo. Dicho de otro modo, una señal es aperiódica (no periódica) cuando cambia constantemente sin exhibir ningún patrón o ciclo que se repita en el tiempo.

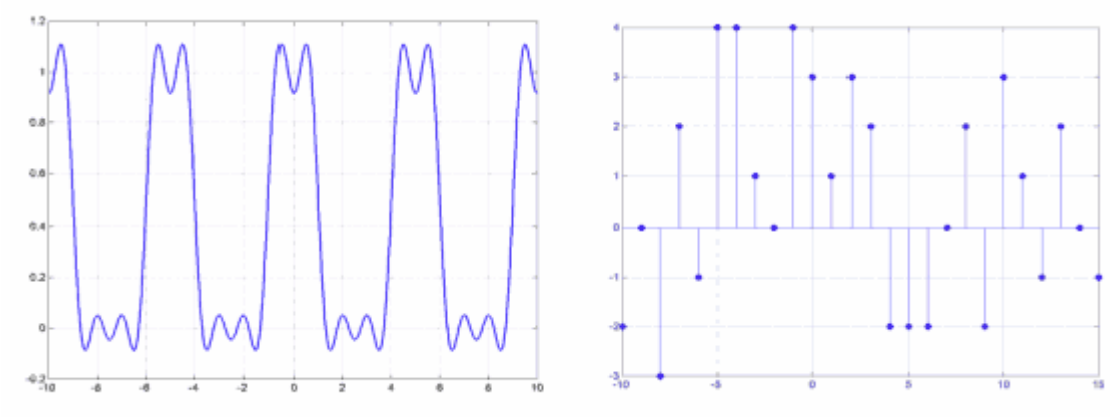


Figura.- 1.4.- *Señal analógica ó continua y digital ó discreta.*

SEÑALES ANALOGICAS:

Las señales analógicas se pueden clasificar en simples o compuestas. Una señal analógica simple, o una **onda seno**, no puede ser descompuesta en señales más simples. Una señal analógica compuesta está formada por múltiples ondas seno.

La señal onda seno es la forma fundamental de una señal continua, analógica y periódica. Visualizada como una única curva oscilante, su cambio a lo largo del curso de un ciclo es suave y consistente, un flujo continuo. La figura 1.5 muestra una onda seno. Cada ciclo está formado por un único arco sobre el eje del tiempo seguido por un único arco por debajo de él. Las ondas seno se pueden describir completamente mediante tres características: *amplitud, periodo (o su inverso frecuencia) y fase.*

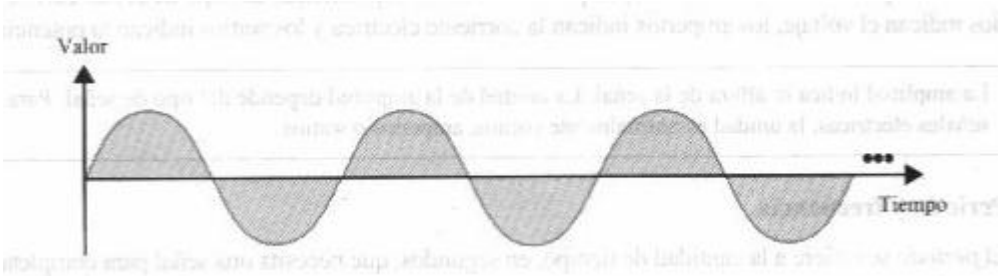


Figura 1.5.- *Una onda seno.*

La ***amplitud*** de una señal en un gráfico es el valor de la señal en cualquier punto de la onda. Es igual a la distancia vertical desde cualquier punto de la onda hasta el eje horizontal. La máxima amplitud de una onda seno es igual al valor más alto que puede alcanzar sobre el eje vertical (véase la figura 1.6). La amplitud se mide en *voltios, amperios o watts,* dependiendo del tipo de señal. Los voltios indican el voltaje, los amperios indican la corriente eléctrica y los watts indican la potencia.

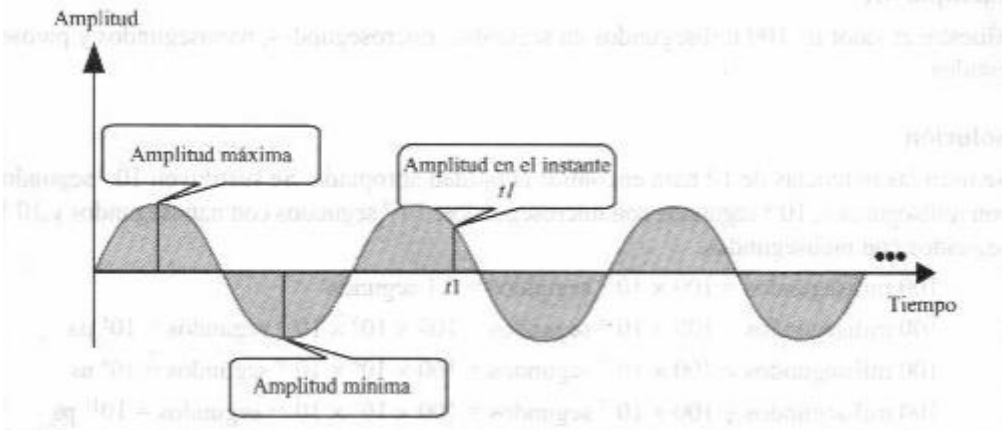


Figura 1.6.- *Amplitud de onda senoidal.*

El ***periodo*** se refiere a la cantidad de tiempo, en segundos, que necesita una señal para completar un ciclo. La ***frecuencia*** indica el número de periodos en un segundo. La frecuencia de una señal es su número de ciclos por segundo. La figura 1.7 muestra los conceptos de periodo y frecuencia.

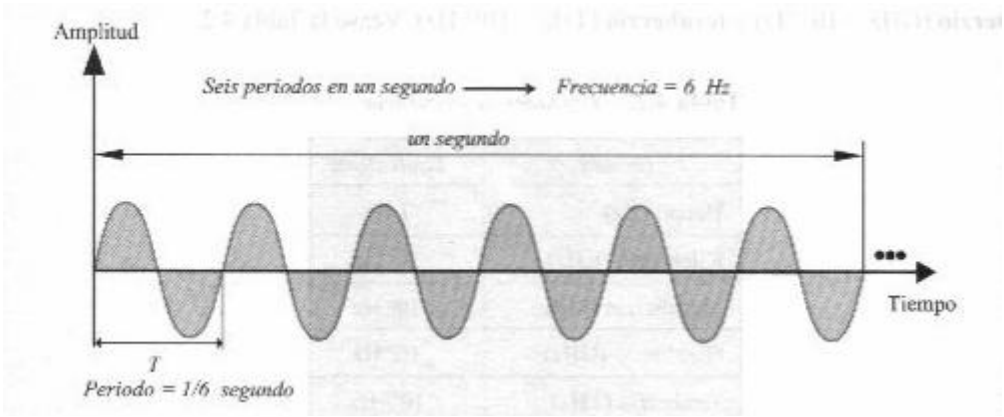


Figura 1.7.- *Período y frecuencia de una onda senoidal.*

Unidad de período: El periodo se expresa en segundos. La industria de la comunicación usa cinco unidades para medir el periodo: **segundo** (s)**, milisegundo** (ms = 10^{-3} s), **micro-segundo** (µs= 10^{-6} s), **nanosegundo** (ns = 10^{-9} s) y **picosegundo** (ps = 10^{-12} s). Véase la figura 1.8.

Unidad	*Equivalente*
Segundos	1s
Milisegundos (ms)	10^{-3} s
Microsegundos (µs)	10^{-6} s
Nanosegundos (ns)	10^{-9} s
Picosegundos (ps)	10^{-12} s

Figura 1.8.- *Unidades de periodo.*

Ejemplo 1.-

Muestre el valor de 100 milisegundos en segundos, microsegundos, nanosegundos y picosegundos.

Solución

Se usan las potencias de 10 para encontrar la unidad apropiada. Se sustituyen 10^{-3} segundos con milisegundos, 10^{-6} segundos con microsegundos, 10^{-9} segundos con nanosegundos y 10^{-12} segundos con picosegundos.

$$100 \text{ milisegundos} = 100 \times 10^{-3} \text{ segundos} = 0.1 \text{ segundo}$$

$$100 \text{ milisegundos} = 100 \times 10^{-3} \text{ segundos} = 100 \times 10^{3} \times 10^{-6} \text{ segundos} = 10^{5} \ \mu s$$

$$100 \text{ milisegundos} = 100 \times 10^{-3} \text{ segundos} = 100 \times 10^{6} \times 10^{-9} \text{ segundos} = 10^{8} \text{ ns}$$

$$100 \text{ milisegundos} = 100 \times 10^{-3} \text{ segundos} = 100 \times 10^{9} \times 10^{-12} \text{ segundos} = 10^{11} \text{ ps}$$

Unidades de frecuencia. La frecuencia se expresa en **hertz (Hz),** en honor al físico alemán Heinrich Rudolf Hertz. La industria de la comunicación usa cinco unidades para medir la frecuencia: **hertz (Hz), kilohertz** (KHz **=** 10^{3} **Hz), megahertz** (MHz **=** 10^{6} **Hz), gigahertz** (GHz **=** 10^{9} Hz) **y terahertz** (THz = 10^{12} Hz). Véase la figura 1.9.

. Unidad	*Equivalente*
Hertz (Hz)	1Hz
Kilohertz (KHz)	10^{3} Hz
Megahertz (MHz)	10^{6} Hz
Gigahertz (GHz)	10^{9} Hz
Terahertz (THz)	10^{12} Hz

Figura 1.9.- *Unidades de frecuencia.*

Ejemplo 2.-

Convertir 14 MHz a Hz, KHz, GHz y THz.

Solución:

Se usan las potencias de 10 para encontrar la unidad apropiada. Se reemplazan 10^{3} Hz con KHz, 10^{6} Hz con MHz, 10^{9} Hz con GHz y 10^{12} Hz con THz.

$$14 \text{ MHz} = 14 \times l0^{6} \text{ Hz}$$

$$14 \text{ MHz} = 14 \times 10^{6} \text{ Hz} = 14 \times 10^{3} \times 10^{3} \text{ Hz} = 14 \times 10^{3} \text{ KHz}$$

$$14 \text{ MHz} = 14 \times 10^{6} \text{ Hz} = 14 \times 10^{3} \times 10^{9} \text{ Hz} = 14 \times 10^{-3} \text{ GHz}$$

$$14 \text{ MHz} = 14 \times 10^{6} \text{ Hz} = 14 \times 10^{6} \times 10^{12} \text{ Hz} = 14 \times 10^{-6} \text{ THz}$$

Conversión de frecuencia a periodo y viceversa. Matemáticamente, la relación entre frecuencia y periodo es que cada una de ellas es la inversa multiplicativa de la otra. Si se da una, se puede derivar inmediatamente la otra.

Frecuencia = 1 / Periodo y Período = 1 / Frecuencia

Ejemplo 3.-
Una onda seno tiene una frecuencia de 6 Hz. ¿Cuál es su periodo?
Solución:
Supongamos que *T* es el periodo y *f* es la frecuencia. Entonces,

$$T = 1 / f = 1/6 = 0.17 \text{ segundos}$$

Ejemplo 4.-
Una onda seno tiene una frecuencia de 8 KHz. ¿Cuál es su periodo?
Solución:
Supongamos que T es el periodo y *f* es la frecuencia. Entonces,

$T = 1 / f = 1/8.000 = 0.000125$ segundos $= 125 \times 10^{6}$ segundos = 125 μs

Ejemplo 5.-
Una onda seno completa un ciclo en 4 segundos. ¿Cuál es su frecuencia?
Solución:
Supongamos que T es el periodo y *f* la frecuencia. Entonces,

$$f = 1/T = 1/4 = 0.25 \text{ Hz}$$

Ejemplo 6.-
Una onda seno completa un ciclo en 25 μs. ¿Cuál es su frecuencia?
Solución:
Supongamos que T es el período y *f* es la frecuencia. Entonces,

$$f = 1/T = 1/(25 \times 10^{-6}) = 40{,}000 \text{ Hz} = 40 \times 10^{3} \text{ Hz} = 40 \text{ KHz}$$

Más sobre la frecuencia:

Ya se sabe que la frecuencia es la relación de una señal con el tiempo y que la frecuencia de una onda es el número de ciclos que completa por segundo. Pero otra forma de mirar la frecuencia es usarla como una medida de la velocidad de cambio. Las señales electromagnéticas son formas de onda oscilatoria; es decir, señales que fluctúan de forma continua y predecible por encima y por debajo de un nivel de energía medio.
La velocidad a la que se mueve una onda seno desde su nivel más bajo a su nivel más alto es su frecuencia. Una señal de 40 Hz tiene la mitad de frecuencia que una señal de 80 Hz; es decir, completa un ciclo en el doble de tiempo que la señal de 80 Hz, por lo que cada ciclo tarda el doble de tiempo para ir de su nivel de voltaje mínimo al máximo. Por tanto, la frecuencia, aunque descrita en ciclos por segundo (Hz), es una medida general de la velocidad de cambio de una señal con respecto al tiempo.

El término ***fase*** describe la posición de la onda relativa al instante de tiempo 0. Si se piensa en la onda como algo que se puede desplazar hacia delante o hacia atrás a lo largo del eje del tiempo, la fase describe la magnitud de ese desplazamiento. Indica el estado del primer ciclo.

La fase se mide en grados o radianes (360 grados son 2 π radianes). Un desplazamiento de fase de 360 grados corresponde a un desplazamiento de un periodo completo; un desplazamiento de fase de 180 grados corresponde a un desplazamiento de la mitad del periodo; un desplazamiento de fase de 90 grados corresponde a un desplazamiento de un cuarto de periodo (véase la figura 1.10).

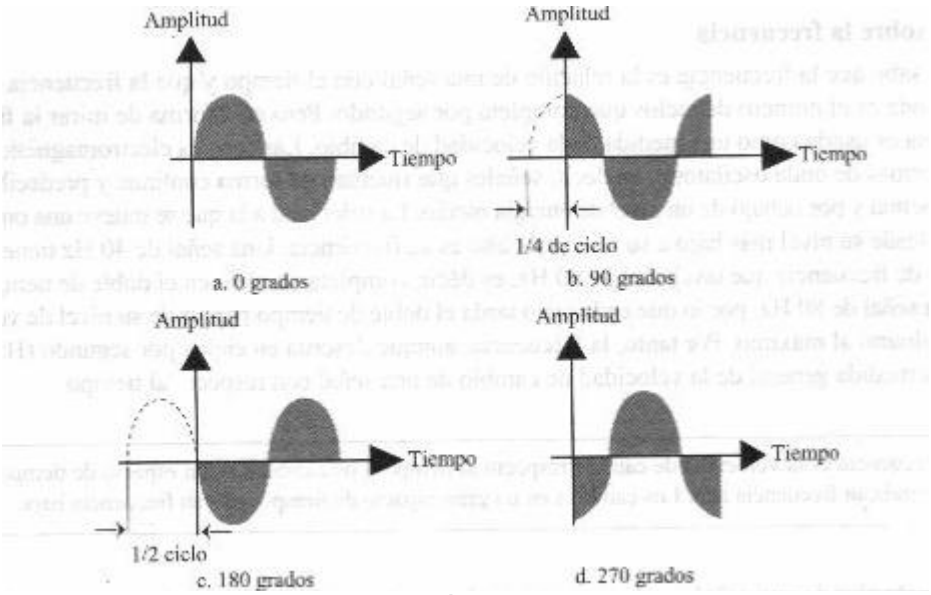


Figura 1.10.- *Relación entre distintas fases.*

Ejemplo 7.-
Una onda seno está desplazada 1/6 de ciclo respecto al tiempo 0. ¿Cuál es su fase?
Solución:
Sabemos que un ciclo completo son 360 grados. Por tanto, 1/6 de ciclo es

$$1/6 \times 360 = 60 \text{ grados}$$

Una comparación visual de la amplitud, frecuencia y fase proporciona una referencia útil para comprender sus funciones. Se pueden introducir cambios en los tres atributos de la señal y controlarlos electrónicamente. Este control proporciona la base para todas las telecomunicaciones (véanse las figuras 1.11, 1.12 y 1.13).

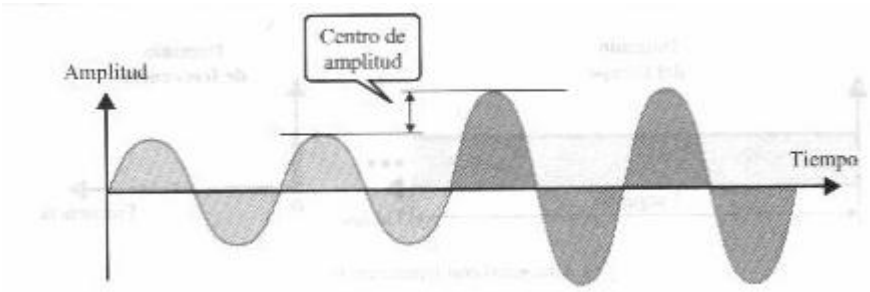


Figura 1.11.- *Cambio de Amplitud.*

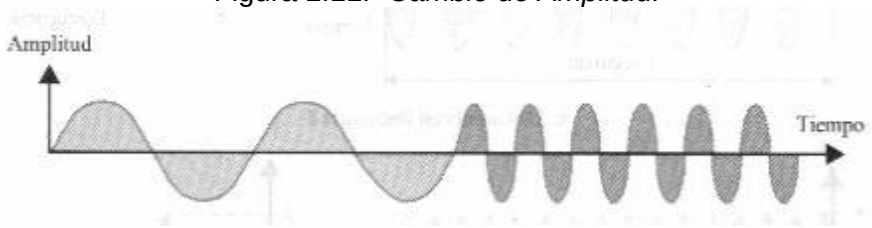


Figura 1.12.- *Cambio de Frecuencia.*

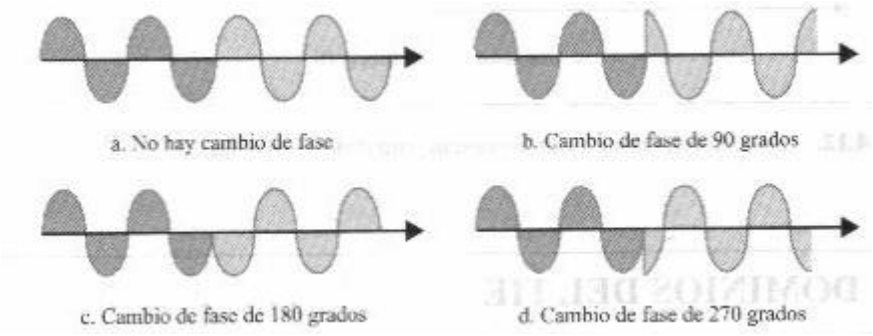


Figura 1.13.- *Cambio de Fase.*

SEÑALES DIGITALES:

Los datos además de poderse presentar en forma analógica, también se pueden presentar en forma digital. Donde un 1 lógico representa un voltaje positivo de + 5 Vcd y un 0 lógico representa un voltaje cero (0 Vcd) que equivale a tierra. La mayoría de las señales digitales son aperíodicas (no periódicas) y por lo tanto, la periodicidad o la frecuencia no se utilizan. En su lugar se usan dos términos para una señal digital: *intervalo de bit* (en lugar de período) y *tasa de bit* (en lugar de frecuencia). El **intervalo de bit** es el tiempo necesario para enviar un único bit; y la **tasa de bit** es el número de intervalos de bits en un segundo. Esto significa que la tasa de bit es el número de bits enviados en un segundo, habitualmente expresado en **bits por segundo** (**bps**). Véase figura 1.14.

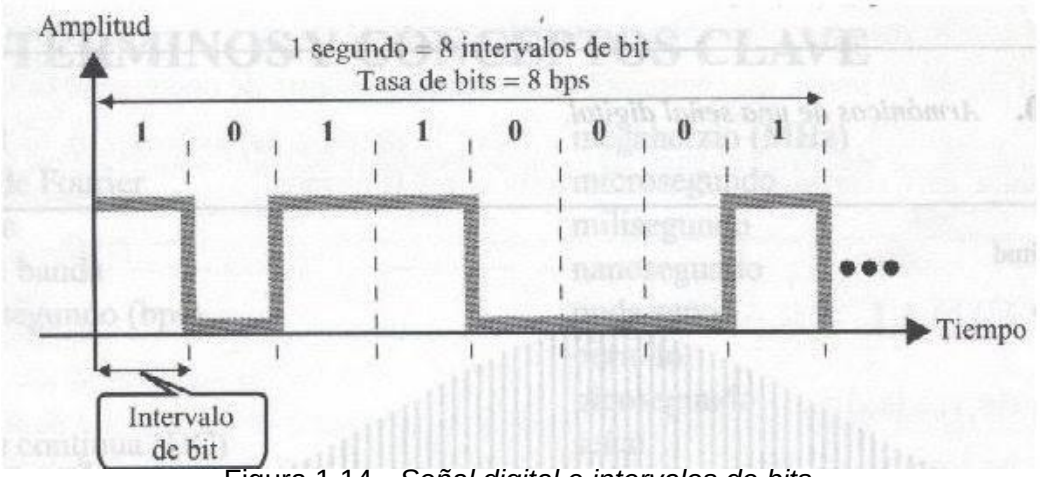


Figura 1.14.- *Señal digital e intervalos de bits.*

Ejemplo 1.- Una señal digital tiene una tasa de bits de 2,000 bps. ¿Cual es la duración de cada bit (intervalo de bit)?
Solución:
El intervalo de bit es la inversa de la tasa de bits.
Intervalo de bit = 1/(tasa de bits) = 1/2,000 = 0.000500 segundos = 500 x 10^{-6} segundos = 500 µseg
Ejemplo 2.- Una señal digital tiene un intervalo de bit de 40 microsegundos. ¿Cuál es la tasa de bits?
Solución:
La tasa de bits es la inversa del intervalo de bit.

Tasa de bits = 1/(intervalo de bit) = 1/(40 x 10^{-6}) = 25,000 bits por segundo
= 25 x 10^{3} bits por segundo = 25 Kbps

SEÑALES ELECTRICAS:

Una **señal eléctrica** es un tipo de señal generada por algún fenómeno electromagnético. Estas señales pueden ser analógicas, si varían de forma continua en el tiempo, o digitales si varían de forma discreta (con valores dados como 0 y 1).

La diferencia entre las señales analógicas y digitales es muy similar a la diferencia entre el tiempo continuo y el tiempo discreto.

Hablaremos de una **señal analógica** en el caso de que los valores que pueda adoptar la señal pertenezca a un conjunto de valores continuo (y que, en general, puede ser real o complejo). La mayoría de las señales producidas por sistemas puramente físicos son de este tipo (ejemplo: la temperatura, la intensidad de luz, el velocímetro, etc).

Ahora, si el conjunto de valores que adopta la señal pertenece a un conjunto discreto de valores, estaremos en el caso de una *discreta o muestreada*. La amplitud de la señal puede ser continua o discreta. Una señal discreta con amplitud discreta se llama **digital.** Este tipo de señales es el de uso más frecuente en los sistemas electrónicos, ya que son las únicas capaces de ser almacenadas en las computadoras.

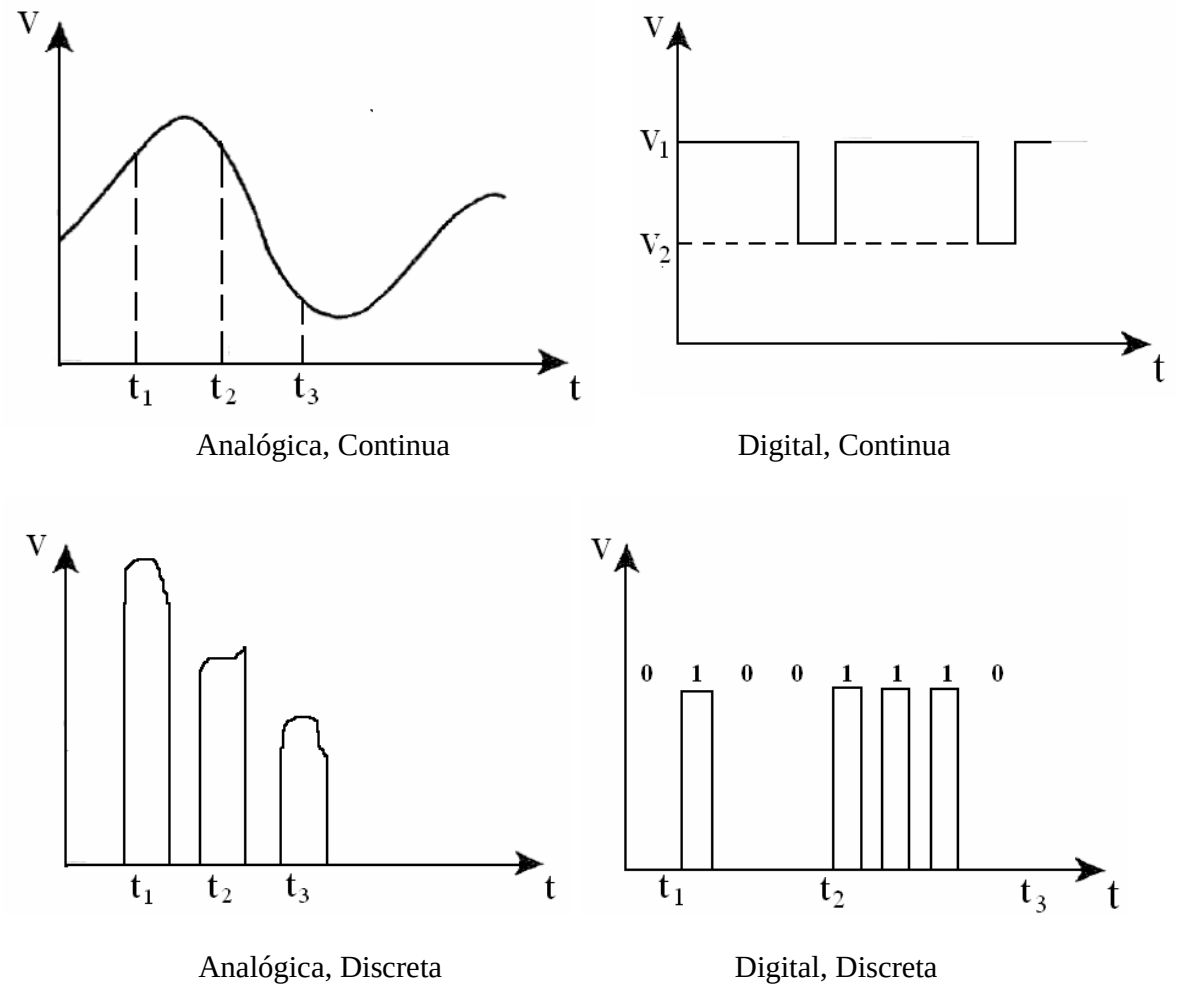


Figura 1.15.- *Ejemplos de señales*

SEÑALES OPTICAS:

En todo sistema de comunicaciones se envía *información* por medio de una señal. La información en un sistema de comunicaciones ópticas se envía por medio de impulsos o de señales moduladas de luz.

Un enlace básico de comunicaciones ópticas consta de tres elementos fundamentales:

1.- Emisor.- Es la fuente productora de luz, generalmente un diodo láser (LD) o diodo emisor de luz (LED). El emisor contiene además una serie de circuitos electrónicos destinados a generar las señales a transmitir, y a suministrarlas al dispositivo optoelectrónico. Las longitudes de onda más apropiadas para comunicaciones ópticas están en la región del infrarrojo.

2.- Medio.- Aunque existen Comunicaciones Ópticas atmosféricas, espaciales o submarinas no guiadas, la gran mayoría de realizan a través de un medio dieléctrico. El medio por excelencia es la *fibra óptica* (sus características se mencionarán en la siguiente unidad). El material empleado más común, por su extraordinaria transparencia, es la sílice (SiO_2). Este material básico va dopado con otros componentes para modificar sus propiedades, en especial su *índice de refracción*. En comunicaciones ópticas a muy corta distancia (algunos metros) están tomando auge las fibras de plástico (POF).

3.- Receptor.- El circuito de recepción es el elemento más complejo del sistema de comunicaciones ópticas. Consta de un *detector*, generalmente optoelectrónico, ya sea un fotodiodo (PIN) o un diodo de avalancha (APD) y de una serie de circuitos recuperadores de la señal: amplificador, filtro, comparador, etc.

Los sistemas de comunicaciones ópticas, adicionalmente, contienen otros elementos, que varían según la aplicación. Algunos de los más importantes son los siguientes.

a) Repetidores:
Cuando la distancia a cubrir por un enlace supera un cierto límite (algunas decenas de km, usualmente), la señal se degrada y se atenúa excesivamente, por lo que se hace necesaria la instalación de *repetidores*. Los repetidores pueden ser simples amplificadores de la señal, o incluir además regeneradores de la misma.
Hasta hace poco tiempo, todos los repetidores instalados eran electrónicos: la señal óptica se detectaba, se pasaba a señal eléctrica, se manipulaba (en su caso) como tal, y se reconvertía de nuevo a señal óptica. Actualmente, los regeneradores siguen realizando estas etapas electrónicamente, pero se están sustituyendo los amplificadores electrónicos por amplificadores ópticos de fibra dopada (EDFA). Estos dispositivos amplifican directamente la señal óptica sin conversiones optoelectrónicas.

b) Elementos pasivos:
La manipulación de señales ópticas es más compleja que la de señales eléctricas, por el simple hecho de que, para que se transmita la señal, no basta con el contacto físico, al estilo de los cables eléctricos, sino que se necesita que las propiedades ópticas de la unión sean adecuadas para permitir el paso de la luz. Con el uso de las fibras ópticas como medio de transmisión, ha surgido toda una serie de dispositivos de apoyo, que se ocupan de la transmisión óptima de la señal óptica. Los dos tipos más importantes son los acopladores y los multiplexores en longitud de onda.

1.4.- Análisis matemático de señales. Análisis de Fourier.

El análisis de Fourier surgió a partir del intento del matemático francés *Jean-Baptiste Joseph Fourier* por hallar la solución a un problema práctico, la conducción del calor en un anillo de hierro. Demostró que se puede obtener una función discontinua a partir de la suma de funciones continuas. Esta tesis fue defendida por Fourier ante la Academia Francesa, lo que motivó severas objeciones de los matemáticos más importantes de su época como Lagrange, Laplace, etc.

Este análisis se divide en las series de Fourier y la transformada de Fourier.

En las **Series de Fourier** permiten descomponer una señal periódica compuesta en una serie, posiblemente infinita, de ondas seno, cada una con una frecuencia y fase distintas.

Las series de Fourier constituyen la herramienta matemática básica del análisis de Fourier empleado para analizar funciones periódicas a través de la descomposición de dicha función en una suma infinita de funciones senoidales mucho más simples (como combinación de senos y cosenos con frecuencias enteras).

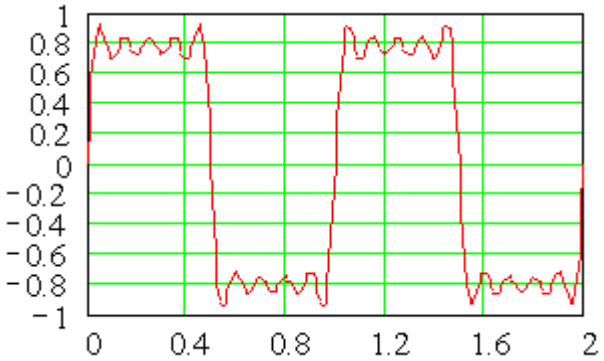
Es una aplicación usada en muchas ramas de la ingeniería, además de ser una herramienta sumamente útil en la teoría matemática abstracta. Áreas de aplicación incluyen análisis vibratorio, acústica, óptica, procesamiento de imágenes y señales, y compresión de datos. En ingeniería, para el caso de los sistemas de telecomunicaciones, y a través del uso de los componentes espectrales de frecuencia de una señal dada, se puede optimizar el diseño de un sistema para la señal portadora del mismo. Refiérase al uso de un analizador de espectros.

Las series de Fourier tienen la forma:

$$\frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cos \frac{2n\pi}{T} t + b_n \sin \frac{2n\pi}{T} t \right]$$

Donde a_ny $b_n$se denominan **coeficientes de Fourier** de la serie de Fourier de la función $f(x)$

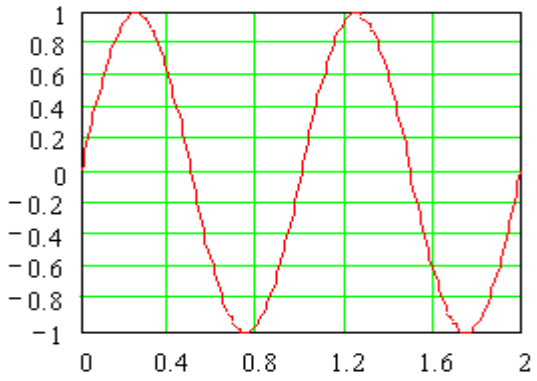
Hace algún tiempo, Fourier, demostró que cualquier señal periódica se puede representar como una composición de ondas seno (sin = sen). Veamos una onda periódica. Esta es la gráfica de una señal que se repite cada segundo.



Claramente se ve que esta señal no es senoidal y pareciera que no tiene ninguna relación con las señales seno. Sin embargo Fourier demostró que una señal periódica siempre se puede representar como una suma de senoidales (senos y cosenos, o senos desfasados). En su honor, a esta representación se le llama ahora *Series de Fourier.*

Fourier no solo mostró que es posible representar una señal periódica mediante senoidales sino que además mostró el método para hacerlo. Asumiendo que la señal se repite cada T segundos, se puede describir como una suma de senoidales. Fourier proporcionó la manera explícita de obtener los coeficientes en una Serie de Fourier. Primero veamos cómo se puede construir una señal a partir de una suma de senoidales.

Como un ejemplo ilustrativo, empezaremos analizando una señal seno simple.

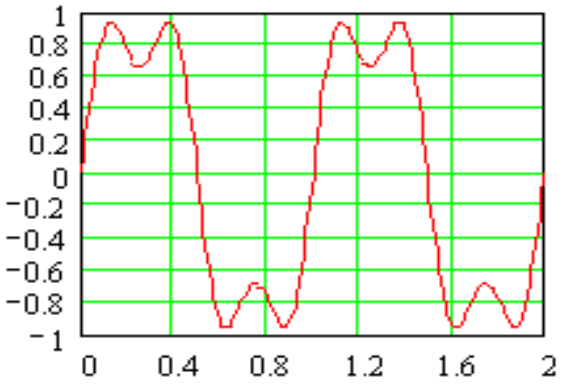


La expresión para esta señal es:

$$Sig(t) = 1 * sen(2\pi t/T) \text{ y } T = 1 \text{ segundo.}$$

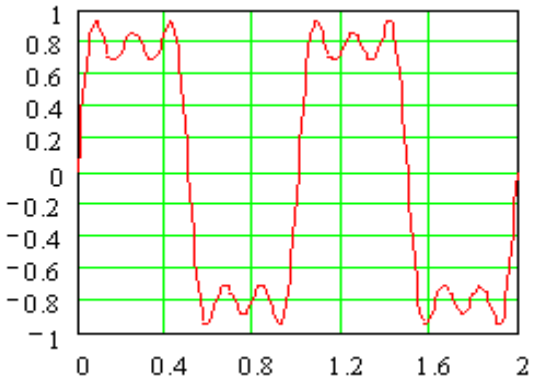
Ahora, le vamos a sumar otra senoidal a la señal seno original. La senoidal que le sumamos será el triple de la frecuencia original y será un tercio de la amplitud original.

$$Sig(t) = 1 * sen(2\pi t/T) + (1/3) * sen(6\pi t/T)$$

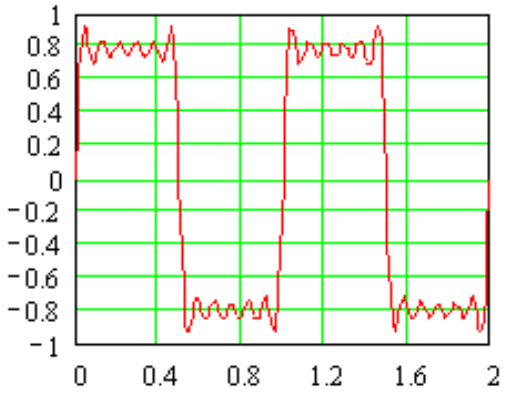


Ahora se ve algo diferente. Si agregamos una nueva señal seno de 5 veces la frecuencia original y de un quinto de la amplitud orginal, se tenemos:

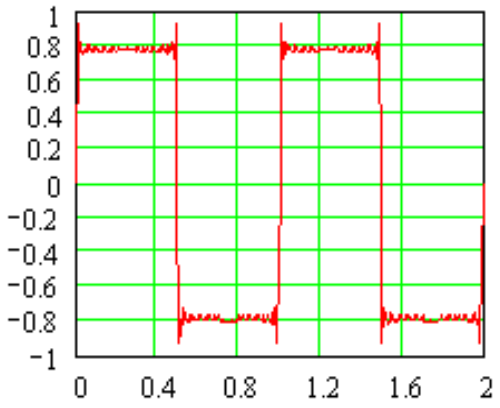
$$Sig(t) = 1 * sen(2\pi t/T) + (1/3) * sen(6\pi t/T) + (1/5) * sen(10\pi t/T)$$



Solo se está añadiendo los términos impares múltiplos de la frecuencia original Así se ve la señal después de anexar la décima primera componente.



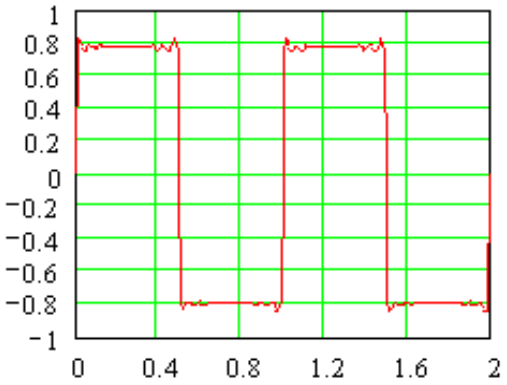
Es señal está cerca de ser una onda cuadrada. Sigamos agregando términos y veamos lo que sucede. Esta es la señal después de anexar 49 componentes.



En este punto parece que el proceso nos da una señal que es cada vez más cercana a la señal de onda cuadrada. Sin embargo, parece que aún le falta un poco para ser una onda cuadrada perfecta. Agreguemos más términos para ver que sucede.

Aquí tenemos la señal con los términos impares hasta la componente 79. Ahora vemos claramente una señal cuadrada con amplitud poco menor a 0.8. La forma en la que hemos

construido esta señal es mediante el uso de los resultados de Fourier. Conocemos la fórmula para la serie que converge a una onda cuadrada.



Para una representación más exacta se requiere que el número de términos aumente y tienda a infinito. Esta es la fórmula

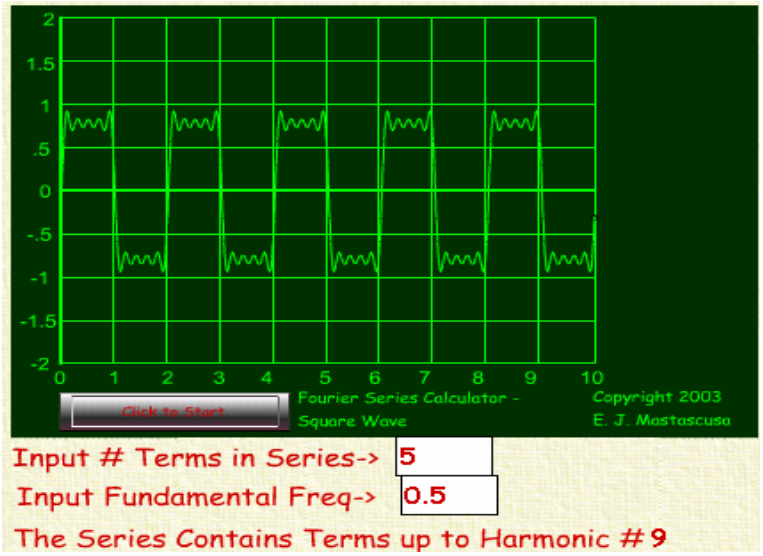
$$\sum_{\substack{n=1 \\ n \text{ impar}}}^{N} (1/n)\sin(n\omega_0 t)$$

A continuación se presenta el uso de un simulador interactivo para experimentación. Permite controlar el número de términos de la sumatoria de la fórmula anterior. También se puede controlar la frecuencia de la primera componente. Para ejecutar, ir a la siguiente dirección:

http://www.facstaff.bucknell.edu/mastascu/eLessonsHTML/Freq/Freq4.html

Ejercicio 1.- En el simulador mencionado, hacer lo siguiente:

- Iniciar con un solo término (Input # Terms in Series) y graficar la respuesta haciendo click dos veces en el botón “Click to start”. Un solo término debe mostrar una onda seno con una amplitud de 1.0.
- Incrementar el número de términos para incluir el tercer armónico (dos términos), el quinto armónico (3 términos), etc.
- ¿Se incrementa o decrementa el valor pico conforme se incrementa el número de términos?
- Determinar si se puede llevar la serie a punto donde la aproximación sea casi el 5% de la onda cuadrada ideal.
- Cuando la serie parezca que ha convergido, determinar el valor de la amplitud de la onda cuadrada. Comparar con la onda senoidal inicial del primer paso.



En este otro caso la función que se simula está dada por la suma siguiente:

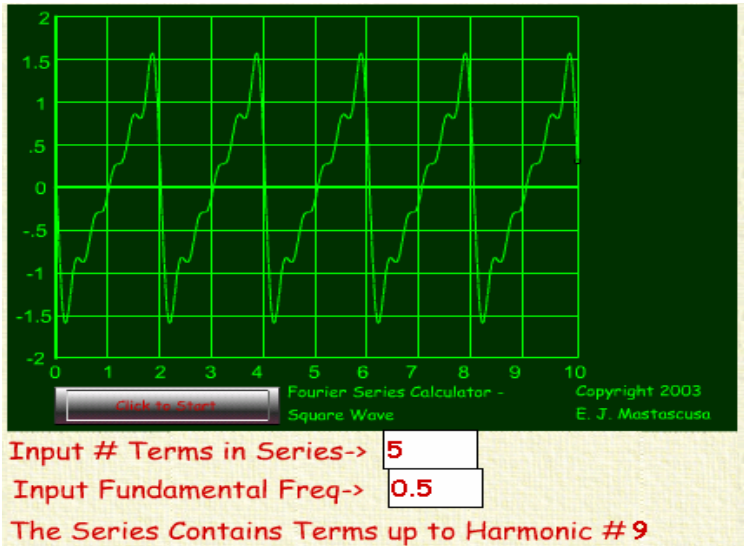
$$\sum_{\substack{n=1 \\ n \text{ impar}}}^{N} (-1/n^2)\sin(n\omega_0 t)$$

Esta es una muestra del simulador. Para experimentar con él, ir nuevamente a la dirección:

http://www.facstaff.bucknell.edu/mastascu/eLessonsHTML/Freq/Freq4.html

Ejercicio 2.- En el simulador mencionado, hacer lo siguiente:

- Iniciar con un solo término y graficar la respuesta. Un solo término debe mostrar una onda seno con una amplitud de 1.0.
- Incrementar el número de términos para incluir el tercer armónico (dos términos), el quinto armónico (3 términos), etc.
- ¿Se aproxima la función a una onda cuadrada?



Cálculo de los coeficientes

La mayoría de las señales periódicas se pueden representar mediante series de senos y cosenos. Aún señales discontinuas (como la función de onda cuadrada o la de diente de sierra de las dos simulaciones previas) no son problemas insuperables.

Considerando que las funciones se pueden imaginar como una composición de senos y cosenos a diferentes frecuencia, y considerando que algunos sistemas lineales procesan señales senoidales en forma dependiente de la frecuencia, significa que la respuesta de un sistema con una entrada periódica se puede predecir utilizando métodos de respuesta en frecuencia.

Muchos tipos de señales se analizan utilizando conceptos de componentes en frecuencia. Se ha desarrollado técnicas computacionales especiales (en particular la FFT o Fast Fourier Transform) para calcular rápidamente las frecuencias componentes de varias señales. Las señales que se han analizado incluyen señales de sonidos en terremotos, vibraciones de puentes bajo cargas dinámicas (así como las vibraciones en diferentes estructuras desde edificios altos hasta vibraciones de aviones) y señales de comunicaciones (incluyendo las señales mismas así como el ruido que interfiere con las señales).

Ahora veamos el cálculo de las frecuencias componentes. En general, una señal periódica se puede representar como una suma de senos y cosenos. También las señales periódicas que tienen una media diferente de cero pueden tener una señal componente constante. Al final las series se convierten en algo como la siguiente. Estas series se pueden usar para representar muchas funciones periódicas. La función f(t) se asume que es periódica.

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{N} a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \sin(n\omega_0 t)$$

Para generar la señal se necesita saber los coeficientes, a_n y b_n.

Para calcular los coeficientes aprovechamos algunas de las propiedades de las señas senoidales. EL punto inicial es integrar un producto de f(t) con uno de los componentes senoidales como se muestran a continuación.

$$\int_0^T f(t)\sin(m\omega_0 t)dt$$

Ahora, si asumimos que la función f(t), se puede representar por la serie mencionada anteriormente, podemos sustituir f(t) con la serie en la integral.

$$\int_0^T \left[a_0 + \sum_{n=1}^{N} a_n\cos(n\omega_0 t) + b_n\sin(n\omega_0 t)\right]\sin(m\omega_0 t)dt$$

Tomar en cuenta que:

$$f = 1/T$$

$$\omega_o = 2\pi f$$

Entonces, cuando se efectúe la integral, se puede usar algunas de las propiedades de las funciones senoidales. En todos los casos, la integral se realiza para exactamente un período de la señal periódica f(t).

$$\int_0^T \sin(n\omega_0 t)\sin(m\omega_0 t)dt \ = 0 \text{ for m not equal to n.}$$

$$\int_0^T \cos(n\omega_0 t)\sin(m\omega_0 t)dt \ = 0 \text{ for all m and n.}$$

Así, al integrar la función f(t), multiplicado por cualquier función seno o coseno, casi todo resulta ser cero. Solamente no se vuelve cero cuando n y m son iguales.

$$\int_0^T \sin(n\omega_0 t)\sin(n\omega_0 t)dt = T/2$$

Efectuando todo los mencionados, concluimos:

$$\int_0^T \left[a_0 + \sum_{n=1}^{N} a_n\cos(n\omega_0 t) + b_n\sin(n\omega_0 t)\right]\sin(n\omega_0 t)dt = b_n T/2$$

ó

$$\int_0^T f(t)\sin(n\omega_0 t)dt = b_n T/2$$

Los cual nos da la forma de calcular cualquier valor de **b** en la Serie de Fourier.

En este punto tenemos la mitad del problema resuelto porque ya pudimos calcular los coeficientes b, pero todavía necesitamos calcular el coeficiente a. Sin embargo, para calcularlo hacemos lo mismo que hicimos para b, y al final obtenemos las siguientes expresiones para los coeficientes.

$$a_n = (2/T)\int_0^T f(t)\cos(n\omega_0 t)dt$$

$$b_n = (2/T)\int_0^T f(t)\sin(n\omega_0 t)dt$$

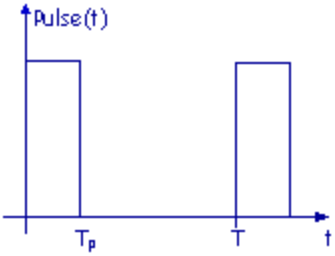
Estas expresiones son válidas para valores de n > 0 y m > 0. El único coeficiente no cubierto es a_o, el cual está dato por:

$$a_0 = (1/T)\int_0^T f(t)dt$$

Así que ya tenemos una forma de encontrar los coeficientes en una Serie de Fourier. Ahora aplicaremos lo aprendido en un ejemplo:

Ejercicio 3.- Pulso repetitivo.

Calcularemos la Serie de Fourier de un pulso general que se repite. La secuencia del pulso se muestra a continuación. La señal de pulso varía entre cero y un volt.



Ahora, para evaluar los coeficientes, hacemos la integral mencionada previamente. Entonces tenemos lo siguiente

$$a_n = (2/T)\int_0^{T_p} A\cos(n\omega_0 t)\,dt = \frac{2A\sin(n\omega_0 t)}{Tn\omega_0}\Bigg|_0^{T_p}$$

ó

$$a_n = 2A\sin(n\boldsymbol{\omega}_o T_p)/(nT\boldsymbol{\omega}_o)$$

$$a_n = A\sin(n\boldsymbol{\omega}_o T_p)/(n\pi)$$

De la misma forma::

$$b_n = (2/T)\int_0^{T_p} A\sin(n\omega_0 t)\,dt = \frac{-2A\cos(n\omega_0 t)}{Tn\omega_0}\Bigg|_0^{T_p}$$

ó

$$b_n = 2A[-\cos(n\boldsymbol{\omega}_o T_p) + 1]/(nT\boldsymbol{\omega}_o)$$

$$b_n = A[-\cos(n\boldsymbol{\omega}_o T_p) + 1]/(n\pi)$$

y

$$a_o = (T_p/T)$$

Ahora calculamos algunos de los coeficientes para un caso en particular. Examinaremos la situación cuando el pulso está en nivel alto para un cuarto del período, por ejemplo, cuando

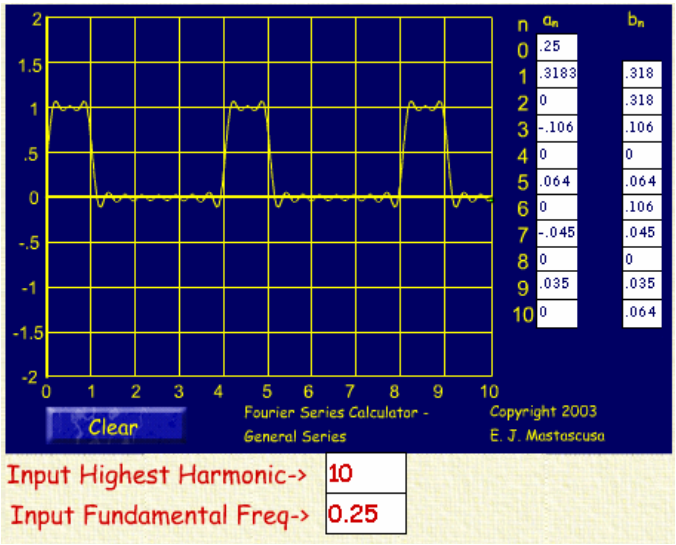
$T_p = T/4$. En estas condiciones tenemos:

$$n\,\omega_o T_p = (n2\pi/T)T_p = n\,\pi/2$$

Nótese que los coeficientes a (los cosenos) serán cero para valores de b pares, mientras que b (los senos) serán cero para cada cuarto valor de n. Los coeficientes calculados se muestran en la tabla siguiente. Para esta tabla, asumimos un período de 4 segundos

. n	a_n	b_n
0	.25	-
1	.31831	.31831
2	0	.31831
3	-.10610	.10610
4	0	0
5	.06366	.06366
6	0	.10610
7	-.04547	.04547
8	0	0
9	.03537	.03537
10	0	.06366

Ahora podemos verificar si estos coeficientes producen un pulso ejecutando el simulador en la dirección: http://www.facstaff.bucknell.edu/mastascu/eLessonsHTML/Freq/Freq4.html. El simulador ha sido pre-cargado con los coeficientes calculados arriba para producir el pulso. Sin embargo, como sólo se está usando hasta la décima armónica, no se obtiene una representación exacta. Esta es una muestra del simulador.



Ejecutar el simulador para verificar que tan cerca estamos y efectuar lo que sigue:

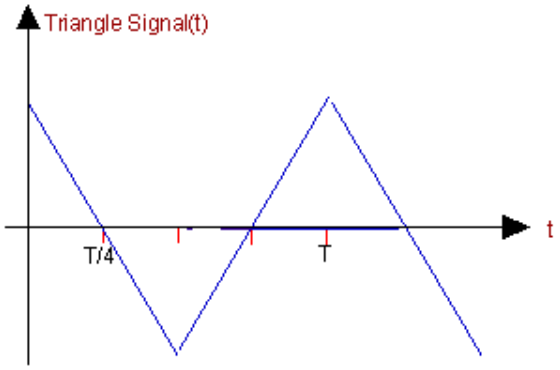
Problemas:

Con base al simulador, efectúa lo siguiente:

- Si a la forma de onda con 10 armónicas se le anexan más armónicos, ¿Se obtendrá el pulso del cual partimos?
- Determinar al valor promedio (La componente DC) de la señal.

Ejercicio 4.-

Ahora calculemos la Serie de Fourier para una onda triangular como la que se muestra a continuación.

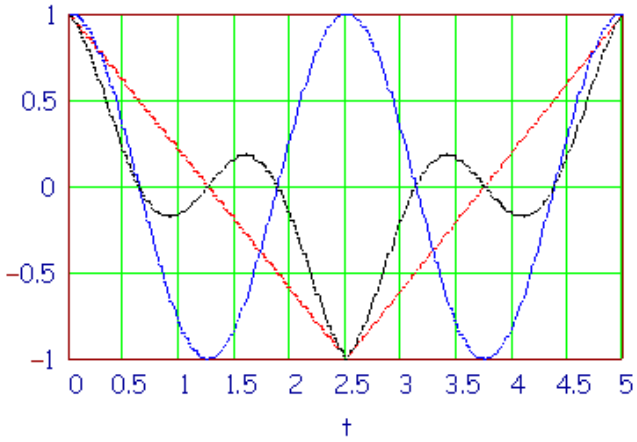


Para calcular los coeficientes necesitamos hacer las integrales que se indicaron previamente. Sin embargo, sabemos algunos detalles acerca de esta función.

- La función triangular es par. En otras palabras, si T(f) es la señal triangular descrita previamente.

$$T(t) = T(-t).$$

- Debido a que la función es par, no habrá componentes impares en el desarrollo de la serie de Fourier. En otras palabras, no hay términos senoidales dado que sin(x) = -sin(x), porque la función seno es impar.
- La función triangular mencionada tiene simetría impar alrededor del cuarto período. En otras palabra, si se mira la onda como si estuviera centrada en t = T/4, se encontrará simetría impar. Las funciones coseno armónicas pares tienen simetría par alrededor de este punto. (Como la segunda armónica coseno, la cuarta armónica coseno, etc.). En esta figura, se puede ver la onda triangular, una segunda armónica de onda coseno y el producto de las dos. El producto de una señal armónica coseno par y esta señal triangular no tiene ningún área neta en un período, o par en medio período.



• La conclusión a la que podemos llegar es que no tendrá términos coseno en las armónicas par. Como no hay términos seno, significa que la Serie de Fourier entera está compuesta de solo las armónicas impares cosenos. Así que sólo necesitamos calcular esos términos.

• Haciendo el cálculo, notamos que sólo necesitamos hacer el cálculo para la mitad de un período y duplicar el resultado.

$$2(2/T)\int_{0}^{T/2} (1 - 4t/T)*\cos(2\pi t/T)\, dt$$

• El resultado es:

$b_k = 8A/(\pi^2 k^2)$ siempre que k sea impar

$b_k = 0$ para valores pares de k.

Puedes revisar un problema de ejemplo de estos cálculos en la dirección:

http://www.facstaff.bucknell.edu/mastascu/eLessonsHTML/Problems/Freq/Interactive/Freq4P00Int.htm#TriangleSignal

La **transformada de Fourier** es básicamente el espectro de frecuencias de una función. Un buen ejemplo de eso es lo que hace el oído humano, ya que recibe una onda auditiva y la transforma en una descomposición en distintas frecuencias (que es lo que finalmente se escucha). El oído humano va percibiendo distintas frecuencias a medida que pasa el tiempo, sin embargo, la transformada de Fourier contiene todas las frecuencias contenidas en todos los tiempos en que existió la señal; es decir, en la transformada de Fourier se obtiene un sólo espectro de frecuencias para toda la función.

Es decir, la transformada de Fourier permite descomponer una señal aperíodica (no periódica) compuesta en una serie infinita de señales seno individuales, cada una de las cuales tiene una frecuencia y fase distintas. En este caso, sin embargo, las frecuencias no son discretas sino continuas. La transformación cambia el dominio del tiempo al dominio de la frecuencia y viceversa. Debido a que el espectro es continuo, el resultado es una envolvente de componentes frecuencia-dominio, en lugar de una gráfica de componentes.

Las transformadas son herramientas matemáticas que permiten mover información del dominio del tiempo a un dominio de la frecuencia y viceversa. Existen una gran cantidad de transformadas. Las transformadas pueden ser categorizadas básicamente en transformadas continuas, transformadas de serie y transformadas discretas.

El concepto de transformada no deja de ser un truco matemático como para hacernos más sencillas las operaciones. Ej.: si tenemos unas tablas de logaritmos, y sabemos que: Se ha transformado una raíz cuadrada en una división, de la misma manera que por logaritmos podemos transformar productos en sumas, divisiones en restas, potencias en productos y raíces en divisiones.

El concepto de transformadas es similar. Gracias a una serie de Fourier podemos transformar cualquier función periódica es una serie finita de señales armónicas (mucho más fácilmente de tratar matemáticamente) y cualquier función, sea o no sea periódica, mediante la transformada de Fourier podemos convertirla en una serie infinita de funciones armónicas, con la facilidad que nos dan las matemáticas para tratar señales sinusoidales y exponenciales.

Resumiendo, la transformada de Fourier nos permite simplificar señales de la vida real que son complicadas en señales que podemos tratar matemáticamente.

Las transformadas continuas son aplicables a señales continuas en el tiempo y frecuencia. Si una señal continua en el tiempo posee solo ciertos componentes frecuenciales, entonces puede decirse que la señal posee espectro discreto. En este caso, la transformada continua se reduce a una transformada en serie. Así las transformadas en serie son un caso especial de transformadas continuas en el tiempo, con componentes frecuenciales discretos.

Las transformadas discretas son aplicables a señales que son discretas en el tiempo y en las frecuencias, tal como son las que aparecen en los sistemas digitales. La transformada de Fourier es un caso especial de la transformada de Laplace. Es una operación matemática que mapea una función en el dominio del tiempo a una función del dominio de la frecuencia. La transformada inversa de Fourier mapea una función del dominio de la frecuencia a una función del dominio del tiempo. FFT se refiere a la transformada rápida de Fourier (Fast Fourier Transform) la cual consta de una colección de algoritmos que explotan la simetría y periodicidad de los coeficientes para acelerar el cálculo de la transformación.

En matemáticas, la transformada de Fourier es una aplicación que hace corresponder a una función *f*, con valores complejos y definida en la recta, con otra función *g* definida de la manera siguiente:

$$g(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) e^{-i\xi x} dx$$

Donde *f* es L^1, o sea *f* tiene que ser una función integrable en el sentido de la *integral de Lebesgue*. El factor, que acompaña la integral en definición facilita el enunciado de algunos de los teoremas referentes a la transformada de Fourier. Aunque esta forma de normalizar la transformada de Fourier es la más comúnmente adoptada, no es universal. En la práctica las variables x y ξ suelen estar asociadas a dimensiones (como el espacio -metros-, frecuencia -segundos^-1-,...) y entonces es correcto utilizar la fórmula alternativa:

$$g(\xi) = \sqrt{\frac{\beta}{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) e^{-i\beta\xi x} dx$$

de forma que la constante beta cancela la dimensiones asociadas a las variables obteniendo un exponente adimensional.

La transformada de Fourier así definida goza de una serie de propiedades de continuidad que garantizan que puede extenderse a espacios de funciones mayores e incluso a espacios de funciones generalizadas.

Además, tiene una multitud de aplicaciones en muchas áreas de la ciencia e ingeniería: la física, la teoría de los números, la combinatoria, el procesamiento de señales (electrónica), la teoría de la probabilidad, la estadística, la óptica, la propagación de ondas y otras áreas. En procesamiento de señales la transformada de Fourier suele considerarse como la descomposición de una señal en componentes de frecuencias diferentes, es decir, *g* corresponde al espectro de frecuencias de la señal *f*.

La rama de la matemática que estudia la transformada de Fourier y sus generalizaciones es denominada análisis armónico.

Son varias las notaciones que se utilizan para la transformada de Fourier de *f*. He aquí algunas de ellas:

$$\mathcal{F}[f], \hat{f}, F(f), \mathcal{F}\{f\}$$

2.- Medios de transmisión y sus características.

Como se vio anteriormente, las computadoras y otros dispositivos de telecomunicación usan señales para representar los datos. Estas señales se transmiten de un dispositivo a otro en forma de energía electromagnética. Las señales electromagnéticas pueden viajar a través del vacío, el aire u otros medios de transmisión. La energía electromagnética, una combinación de campos eléctricos y magnéticos vibrando entre sí, comprende a la corriente eléctrica alterna, las señales eléctricas de voz, a las ondas de radio, a la luz infrarroja, a la luz visible, a la luz ultravioleta y a los rayos X, gamma y cósmicos. Cada uno de ellos constituye una porción del espectro electromagnético (véase la figura 2.1).

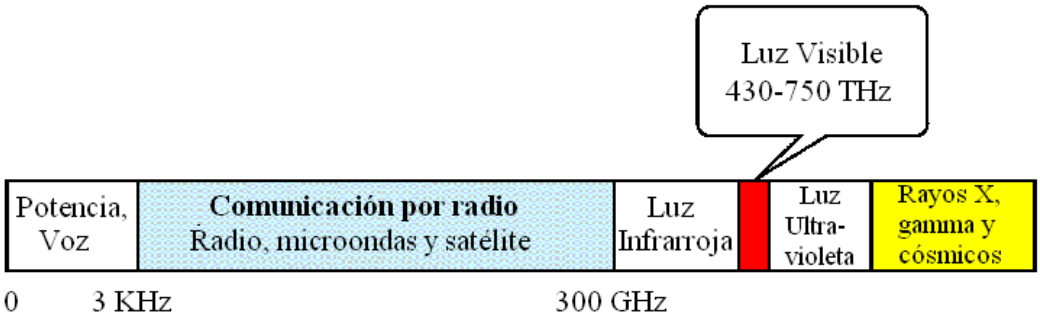


Figura 2.1.- *Espectro electromagnético.*

Sin embargo, no todas las porciones del espectro se pueden usar realmente para las telecomunicaciones y los medios para conducir aquellas que son utilizables están limitados a unos pocos tipos.

Las frecuencias en la banda de voz se transmiten generalmente en forma de corrientes a través de hilos de metal, como los pares trenzados o los cables coaxiales. Las radio frecuencias pueden viajar a través del aire o del espacio, pero necesitan mecanismos específicos de transmisión y recepción. La luz visible, el tercer tipo de energía electromagnética que se usa actualmente para las telecomunicaciones, se conduce usando un cable de fibra óptica.

Los medios de transmisión se pueden dividir en dos grandes categorías: guiados y no guiados (véase la figura 2.2).

Figura 2.2.- *Clases de medios de transmisión.*

2.1.- Guiados:

Los medios guiados son aquellos que proporcionan un conductor de un dispositivo al otro e incluyen cables de pares trenzados, cables coaxiales y cables de fibra óptica (véase la figura 2.3).

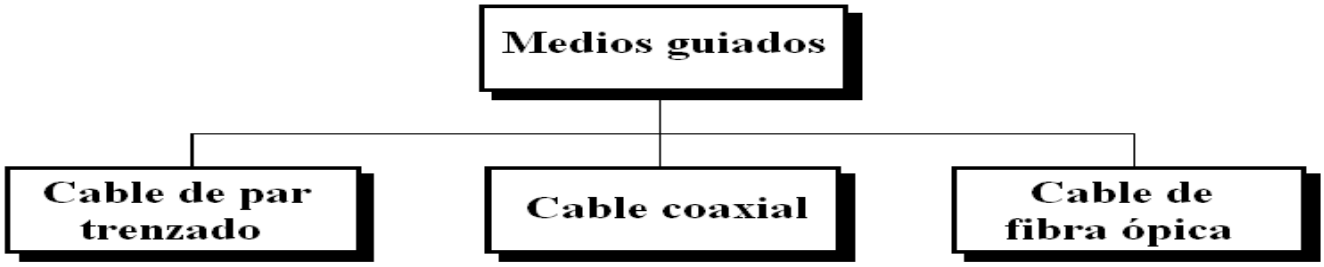


Figura 2.3.- *Clases de medios guiados.*

Una señal viajando por cualquiera de estos medios es dirigida y contenida por los límites físicos del medio. El par trenzado y el cable coaxial usan conductores metálicos (de cobre) que aceptan y transportan señales de corriente eléctrica. La fibra óptica es un cable de cristal o plástico que acepta y transporta señales en forma de luz.

Par trenzado:

El cable de par trenzado se presenta en dos formas: sin blindaje y blindado.

Cable de par trenzado sin blindaje (UTP)

El cable de par trenzado sin blindaje (UTP, *Unshielded Twisted Pair)* es el tipo más frecuente de medio de comunicación que se usa actualmente. Aunque es el más familiar por su uso en los sistemas telefónicos, su rango de frecuencia es adecuado para transmitir tanto datos como voz (véase la figura 2.4). Un par trenzado está formado por dos conductores (habitualmente de cobre), cada uno con su aislamiento de plástico de color. El aislamiento de plástico tiene un color asignado a cada banda para su identificación (véase la figura 2.5). Los colores se usan tanto para identificar los hilos específicos de un cable como para indicar qué cables pertenecen a un par y cómo se relacionan con los otros pares de un manojo de cables.

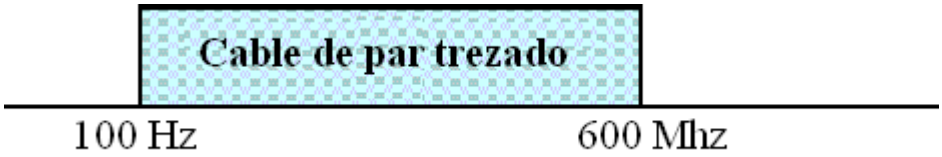


Figura 2.4.- *Rango de frecuencias para un cable de par trenzado*

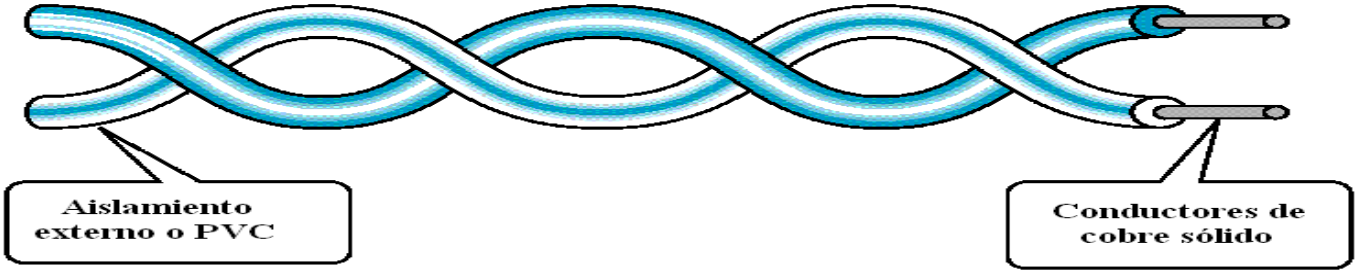


Figura 2.5.- *Cable de par trenzado.*

En el pasado se usaron dos cables planos paralelos para la comunicación. Sin embargo la interferencia electromagnética de dispositivos tales como motores podía originar ruidos en los cables. Si los dos cables son paralelos, el cable más cercano a la fuente de ruido tiene más interferencia y termina con un nivel de tensión más alto que el cable que está más lejos, lo que da como resultado cargas distintas y una señal dañada (véase la figura 2.6).

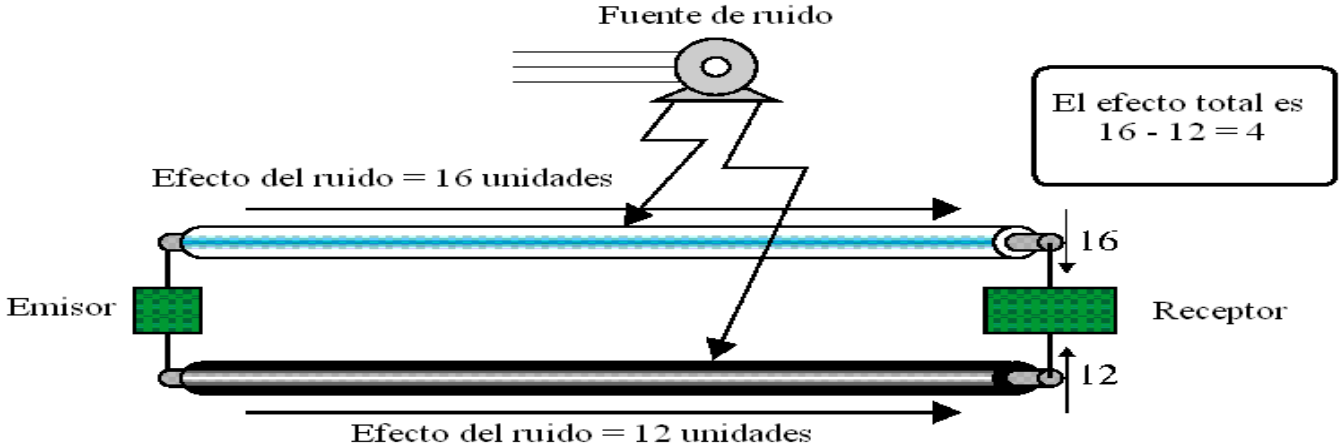


Figura 2.6.- *Efecto de ruido sobre las líneas paralelas.*

Sin embargo, si los dos cables están trenzados entre sí en intervalos regulares (entre 2 y 12 trenzas por pie), cada cable está cerca de la fuente del ruido durante la mitad del tiempo y lejos durante la otra mitad. Por tanto, con el trenzado, el efecto acumulativo de la interferencia es igual en ambos cables (examine la figura 2.7).

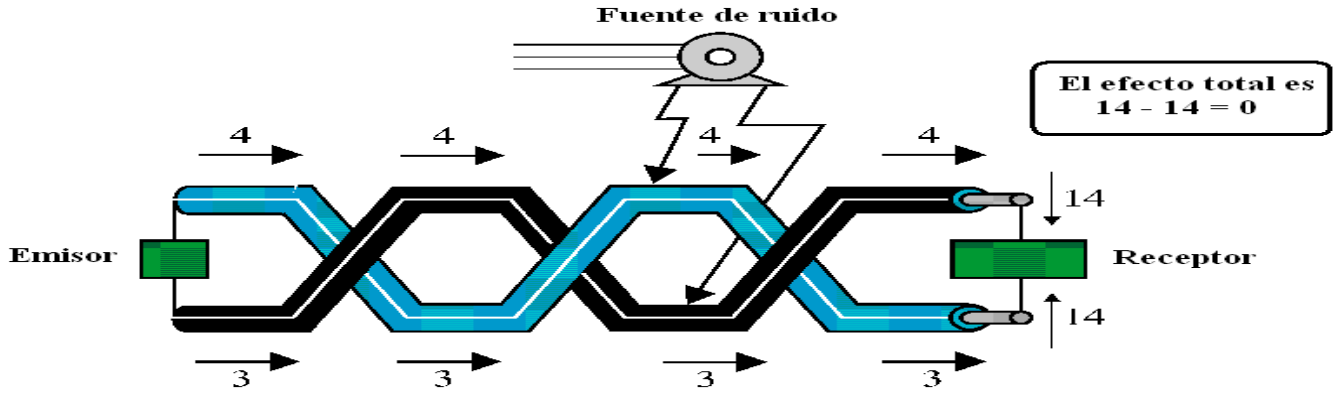


Figura 2.7.- *Efecto del ruido en líneas de par trenzado.*

Cada sección de cable tiene una carga de 4 cuando está en la parte alta del trenzado y de 3 cuando está en la parte baja. El efecto total del ruido en el receptor es 0 (14 -14). El trenzado no siempre elimina el impacto del ruido, pero lo reduce significativamente.

Las ventajas del UTP son su precio y su facilidad de uso. El UTP es barato, flexible y fácil de instalar. En muchas tecnologías de LAN, incluyendo Ethernet y Anillo con paso de testigo, se usa UTP de gama alta. La figura 2.8 muestra un cable que contiene cuatro pares trenzados sin blindaje. Su impedancia típica es de 100 ohmios.

Figura 2.8.- *Cable de 4 pares de hilos trenzados sin blindaje.*

- **Categoría 1**: Actualmente no reconocido por TIA/EIA. Previamente usado para comunicaciones telefónicas POTS, ISDN y cableado de timbrado.
- **Categoría 2**: Actualmente no reconocido por TIA/EIA. Previamente fue usado con frecuencia en redes token ring de 4 Mbit/s.
- **Categoría 3**: Actualmente definido en TIA/EIA-568-B, usado para redes de datos usando frecuencias de hasta 16 MHz. Historicamente popular (y todavía usado) para redes ethernet de 10 Mbit/s. Debe tener al menos nueve trenzas por metro.
- **Categoría 4**: Actualmente no reconocido por TIA/EIA. Posee desempeño de hasta 20 MHz, y fue frecuentemente usado en redes token ring de 16 Mbit/s. Tambien de nueve trenzas por metro.
- **Categoría 5**: Actualmente no reconocido por TIA/EIA. Posee desempeño de hasta 100 MHz, y es frecuentemente usado en redes ethernet de 100 Mbit/s . Es posible usarlo para ethernet de gigabit 1000BASE-T.

- **Categoría 5e**: Actualmente definido en TIA/EIA-568-B. Posee desempeño de hasta 100 MHz, y es frecuentemente usado tanto para ethernet 100 Mbit/s como para ethernet 1000 Mbit/s (gigabit).
- **Categoría 6**: Actualmente definido en TIA/EIA-568-B. Posee desempeño de hasta 250 MHz, más del doble que las categorías 5 y 5e. Usado principalmente para Gigabit
- **Categoría 6a**: Especificacíon futura para aplicaciones de 10 Gbit/s.
- **Categoría 7**: Nombre informal aplicado a cableado de clase F de ISO/IEC 11801. Este estándar especifica 4 pares blindados individualmente dentro de otro blindaje. Diseñado para transmisión a frecuencias de hasta 600 MHz.

Los cables UTP se conectan habitualmente a los dispositivos de la red a través de un tipo de conector y un tipo de enchufe como el que se usa en las clavijas telefónicas. Los conectores pueden ser machos (el enchufe) o hembras (el receptáculo). Los conectores machos entran en los conectores hembras y tienen una pestaña móvil (denominada llave) que los bloquea cuando quedan ubicados en su sitio. Cada hilo de un cable está unido a un conductor (o patilla) del conector. Los conectores que se usan más frecuentemente para estos enchufes son los RJ45, que tienen ocho conductores, uno para cada hilo de cuatro pares trenzados.

Cable de par trenzado con blindado global (FTP)

En este tipo de cable como en el UTP, sus pares no están blindados, pero sí dispone de un blindaje global de todo el conjunto de pares para mejorar su nivel de protección ante interferencias externas. Su impedancia característica típica es de 120 Ohmios y sus propiedades de transmisión son más parecidas a las del UTP. Además, puede utilizar los mismos conectores RJ45. Tiene un precio intermedio entre el UTP y STP. Ver figura 2.9.

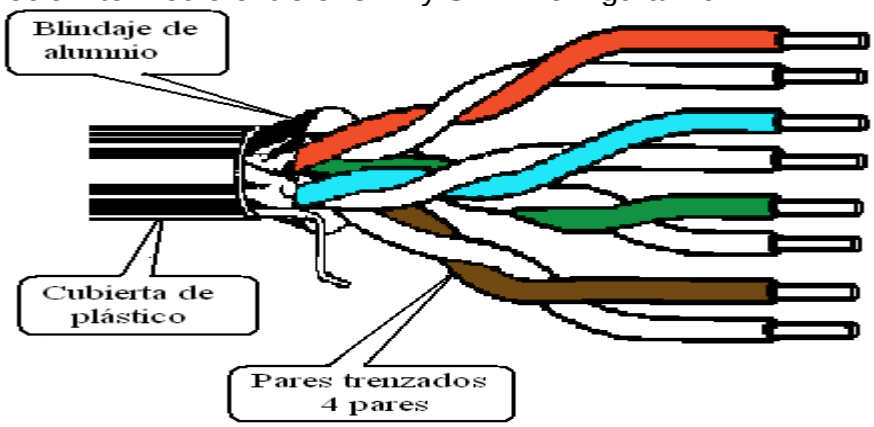


Figura 2.9.- *Cable de par trenzado blindado de aluminio (FTP).*

Cable de par trenzado blindado (STP)

El cable de par trenzado blindado (STP, *Shielded Twisted Pair)* tiene una funda de metal o un recubrimiento de malla entrelazada que rodea cada par de conductores aislados (véase la figura 2.10). La carcasa de metal evita que penetre ruido electromagnético. También elimina un fenómeno denominado interferencia, que es un efecto indeseado de un circuito (o canal) sobre otro circuito (o canal). Se produce cuando una línea (que actúa como antena receptora) capta alguna de las señales que viajan por otra línea (que actúa como antena emisora). Este efecto se experimenta durante las conversaciones telefónicas cuando se oyen conversaciones de fondo. Blindando cada par de cable de par trenzado se pueden eliminar la mayor parte de las interferencias. El STP tiene las mismas consideraciones de calidad y usa los mismos conectores

que el UTP, pero es necesario conectar el blindaje a tierra. Los materiales y los requisitos de fabricación del STP son más caros que los del UTP, pero dan como resultado cables menos susceptibles al ruido. Su impedancia típica es de 150 ohmios.

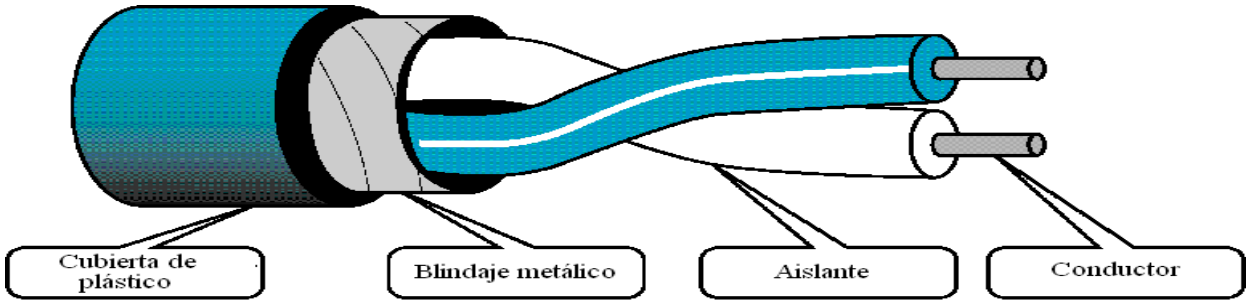


Figura 2.10.- Cable *de par trenzado blindado por par (STP).*

Cable coaxial:

El cable coaxial (o *coax)* transporta señales con rangos de frecuencias más altos que los cables de pares trenzados (véase la figura 2.11), en parte debido a que ambos medios están construidos de forma bastante distinta.

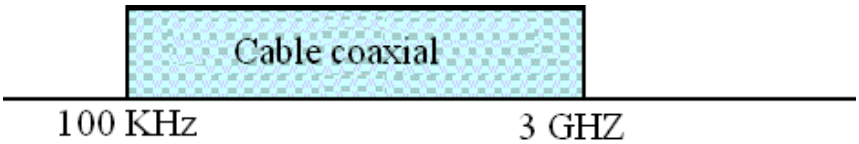


Figura 2.11.- *Rango de frecuencias para un cable coaxial.*

En lugar de tener dos hilos, el cable coaxial tiene un núcleo conductor central formado por un hilo sólido o enfilado (habitualmente cobre) recubierto por un aislante de material dieléctrico, que está, a su vez, recubierto por una hoja exterior de metal conductor, malla o una combinación de ambas (también habitualmente de cobre). La cubierta metálica exterior sirve como blindaje contra el ruido y como un segundo conductor, lo que completa el circuito. Este conductor exterior está también recubierto por un escudo aislante y todo el cable está protegido por una cubierta de plástico (véase la figura 2.12).

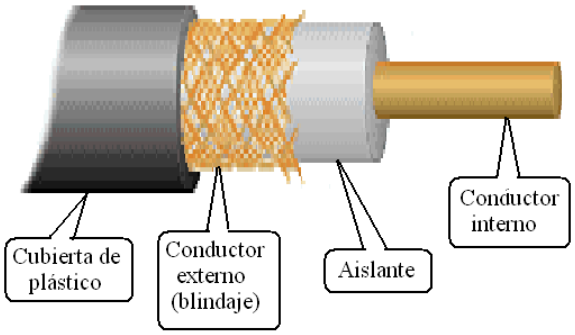


Figura 2.12.- *Cable coaxial.*

Normas de cable coaxial

Los distintos diseños del cable coaxial se pueden categorizar según sus clasificaciones de radio del gobierno (RG). Cada número RG denota un conjunto único de especificaciones físicas,

incluyendo el grosor del cable del conductor interno, el grosor y el tipo del aislante interior, la construcción del blindaje y el tamaño y el tipo de la cubierta exterior.

Cada cable definido por las clasificaciones RG está adaptado para una función especializada. Los más frecuentes son:

RG-8 con 50 Ohmios y es usado en Ethernet de cable grueso.
RG-9 con 50 Ohmios y es usado en Ethernet de cable grueso.
RG-11 con 50 Ohmios y es usado en Ethernet de cable grueso.
RG-58 con 50 Ohmios y es usado en Ethernet de cable fino.
RG-59 con 75 Ohmios y es usado para TV.

Conectores de los cables coaxiales:

A lo largo de los años, se han diseñado un cierto número de conectores para su uso en el cable coaxial, habitualmente por fabricantes que buscaban soluciones específicas a requisitos de productos específicos. Unos pocos de los conectores más ampliamente usados se han convertido en normas. El más frecuente de todos ellos se denomina conector en barril por su forma. De los conectores en barril, el más popular es el conector de red a bayoneta (BNC, *Bayonet Network Connector)* (Ver figura 2.13)*,* que se aprieta hacia dentro y se bloquea en su lugar dando media vuelta.

Otros tipos de conectores de barril se atornillan juntos, lo que necesita más esfuerzo de instalación, o simplemente se aprietan sin bloqueo, lo que es menos seguro. Generalmente, un cable termina en un conector macho que se enchufa o se atornilla en su conector hembra correspondiente asociado al dispositivo. Todos los conectores coaxiales tienen una única patilla que sale del centro del conector macho y entra dentro de una funda de hierro del conector hembra. Los conectores coaxiales son muy familiares debido a los cables de TV y a los enchufes de VCR, que emplean tanto los de presión como los deslizantes.

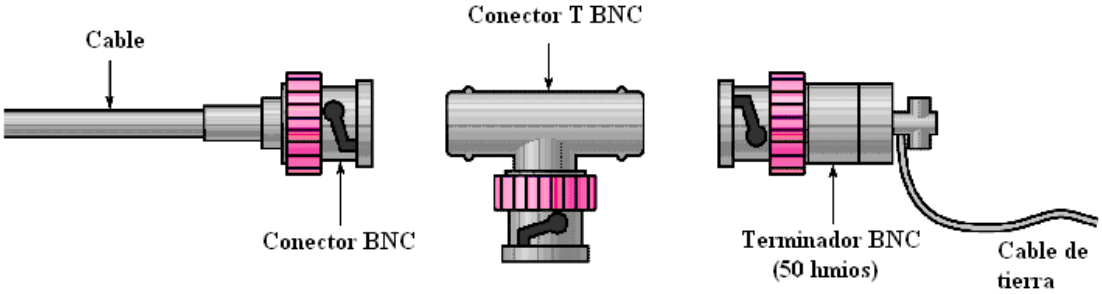


Figura 2.13.- *Conectores para cable coaxial.*

Otros dos tipos de conectores que se usan frecuentemente son los conectores T y los terminadores. Un conector T (que se usa en la Ethernet de cable fino) permite derivar un cable secundario u otros cables de la línea principal. Un cable que sale de una computadora, por ejemplo, se puede ramificar para conectarse a varios terminales. Los terminadores son necesarios en las topologías de bus donde hay un cable principal que actúa como una troncal con ramas a varios dispositivos, pero que en sí misma no termina en ningún dispositivo. Si el cable principal se deja sin terminar, cualquier señal que se transmita sobre él genera un eco que rebota hacia atrás e interfiere con la señal original. Un terminador absorbe la onda al final del cable y elimina el eco de vuelta.

Fibra óptica:

Hasta este momento, se han visto cables conductores (de metal) que transmiten señales en forma de corriente. La fibra óptica, por otro lado, está hecha de plástico o de cristal y transmite las señales en forma de luz. Para comprender cómo funciona la fibra óptica es necesario explorar primero varios aspectos de la naturaleza de la luz.

La naturaleza de la luz

La luz es una forma de energía electromagnética que alcanza su máxima velocidad en el vacío: 300.000 kilómetros/segundo (aproximadamente, 186.000 millas/segundo). La velocidad de la luz depende del medio por el que se propaga (cuanto más alta es la densidad, más baja es la velocidad).

Refracción.- La luz se propaga en línea recta mientras se mueve a través de una única sustancia uniforme. Si un rayo de luz que se propaga a través de una sustancia entra de repente en otra (más o menos densa), su velocidad cambia abruptamente, causando que el rayo cambie de dirección. Este cambio se denomina **refracción.** Esto lo podemos observar si tenemos una varilla que sobresale de un vaso de agua, la cual parecerá estar torcida, o incluso rota (figura 2.14), debido a que la luz a través de la que la vemos cambia de dirección a medida que se mueve del aire al agua.

Figura 2.14.- *Efecto de la refracción de la luz.*

La dirección en la que se refracta un rayo de luz depende del cambio de densidad que encuentre. Un rayo de luz que se mueva de una sustancia menos densa a un medio más denso se curva hacia el eje vertical. Los dos ángulos formados por el rayo de luz en relación al eje vertical se denominan: **I** para el incidente, y **R** para el refractado. En la figura 2.15a, el rayo se transmite desde un medio menos denso a un medio más denso. En este caso, el ángulo R es menor que el ángulo I. Sin embargo, en la figura 2.15b, el rayo se propaga de un medio más denso a un medio menos denso. En este caso, el valor de I es más pequeño que el valor de R. En otras palabras, cuando la luz penetra en un medio más denso, el ángulo de incidencia es mayor que el ángulo de refracción; y cuando la luz penetra en un medio menos denso, el ángulo de incidencia es menor que el ángulo de refracción.

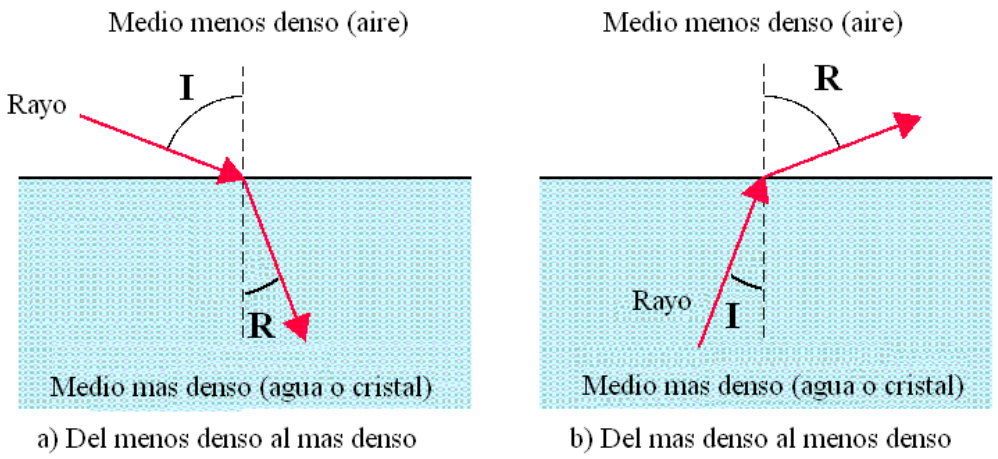


Figura 2.15.- *Refracción de la luz.*

La tecnología de fibra óptica hace uso de las propiedades que se muestran en la figura 2.15b para controlar la propagación de la luz a través de un canal de fibra.

Ángulo crítico. Examinemos ahora la figura 2.16. Una vez más tenemos un rayo de luz que se mueve de un medio más denso a otro menos denso. Sin embargo, en este ejemplo se incrementa gradualmente el ángulo de incidencia medido desde la vertical. A medida que se incrementa el ángulo de incidencia, también lo hace el ángulo de refracción. Este se aleja igualmente del eje vertical y se hace cada vez más próximo al horizontal.

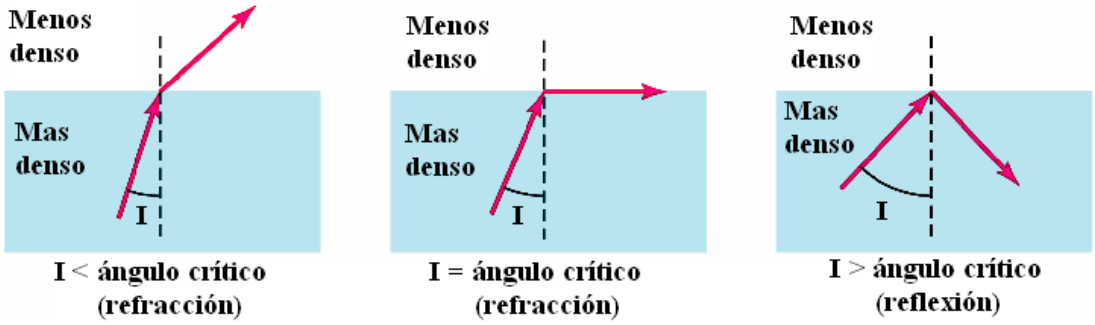


Figura 2.16.- *Ángulo crítico.*

En algún punto de este proceso, el cambio del ángulo de incidencia da como resultado un ángulo de refracción de 90 grados, de forma que el rayo refractado se mueve a lo largo de la horizontal. El ángulo de incidencia en este punto es el que se conoce como **ángulo crítico.**

Reflexión. Cuando el ángulo de incidencia se hace mayor que el ángulo crítico, se produce un fenómeno denominado **reflexión** (o, más exactamente, reflexión completa, porque algunos aspectos de la reflexión siempre coexisten con la refracción). En este caso, ya no pasa nada de luz al medio menos denso, porque el ángulo de incidencia es siempre igual al **ángulo de reflexión** (véase la figura 2.16).

La fibra óptica usa la reflexión para transmitir la luz a través de un canal. Un núcleo de cristal o plástico se rodea con una cobertura de cristal o plástico menos denso. La diferencia de densidad de ambos materiales debe ser tal que el rayo de luz que se mueve a través del núcleo sea reflejado por la cubierta en lugar de ser refractado por ella. La información se codifica dentro de un rayo de luz como series de destellos encendido-apagado que representan los bits uno y cero.

Modos de propagación:
La tecnología actual proporciona dos modos de propagación de la luz a lo largo de canales ópticos, cada uno de los cuales necesita fibras con características distintas: multimodo y mono-modo. A su vez, el multimodo se puede implementar de dos maneras: índice escalonado o de índice de gradiente gradual (véase la figura 2.17).

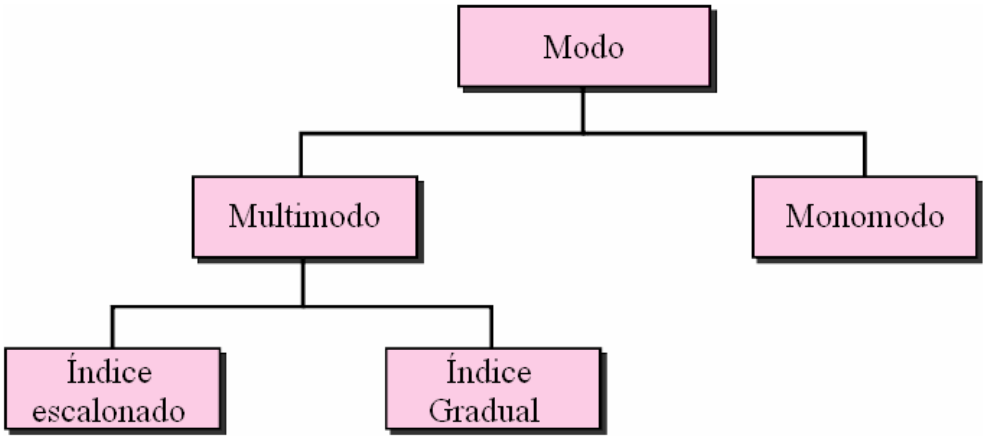


Figura 2.17.- *Modos de propagación.*

Multimodo. El multimodo se denomina así porque hay múltiples rayos de luz de una fuente luminosa que se mueven a través del núcleo por caminos distintos. Cómo se mueven estos rayos dentro del cable depende de la estructura del núcleo.

En la **fibra multimodo de índice escalonado,** la densidad del núcleo permanece constante desde el centro hasta los bordes. Un rayo de luz se mueve a través de esta densidad constante en línea recta hasta que alcanza la interfaz del núcleo y la cubierta**.** En la interfaz, hay un cambio abrupto a una densidad más baja que altera el ángulo de movimiento del rayo. El término índice escalonado se refiere a la rapidez de este cambio.

La figura 2.18 muestra varios haces (o rayos) que se propagan a través de una fibra de índice escalonado. Algunos rayos del centro viajan en línea recta a través del núcleo y alcanzan el destino sin reflejarse o refractarse. Algunos otros rayos golpean la interfaz del núcleo y se reflejan en un ángulo menor que el ángulo crítico; estos rayos penetran la cubierta y se pierden. Todavía quedan otros que golpean el borde del núcleo con ángulos mayores que el ángulo crítico y se vuelven a reflejar dentro del núcleo hasta el otro lado, balanceándose hacia delante y hacia atrás a lo largo del canal hasta que alcanzan su destino.

Cada rayo se refleja fuera de la interfaz en un ángulo igual a su ángulo de incidencia. Cuanto mayor sea el ángulo de incidencia, más amplio es el ángulo de reflexión. Un rayo con un ángulo de incidencia menor necesitará más balanceos para viajar la misma distancia que un rayo con un ángulo de incidencia mayor. En consecuencia, el rayo con el ángulo de incidencia más pequeño debe viajar más rápido para alcanzar su destino. Esta diferencia en la longitud del camino significa que distintos rayos llegan al destino en momentos distintos. Puesto que los distintos rayos son recombinados en el receptor, el resultado es una señal que no es ya una réplica exacta de la señal que se retransmitió. Esta señal ha sido distorsionada por los retrasos de la propagación. Esta distorsión limita la tasa de datos disponible y hace que el cable multimodo de índice escalonado sea inadecuado para ciertas aplicaciones precisas.

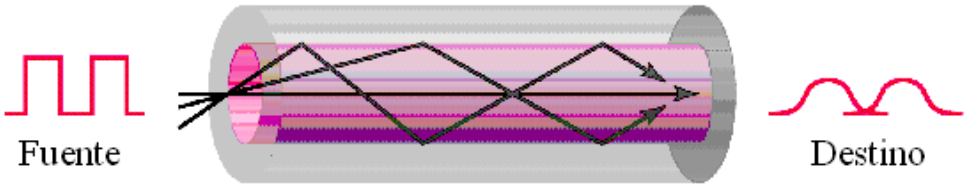


Figura 2.18.- *Fibra multimodo de índice escalonado.*

Hay un segundo tipo de fibra, denominado **fibra multimodo de índice gradual,** que decrementa esta distorsión de la señal a través del cable. La palabra *índice* se refiere en este caso al índice de refracción. Como se ha visto anteriormente, el índice de refracción está relacionado con la densidad. Por tanto, una fibra de índice gradual tiene densidad variable. La densidad es mayor en el centro del núcleo y decrece gradualmente hasta el borde. La figura 2.19 muestra el impacto de esta densidad variable en la propagación de los rayos luminosos.

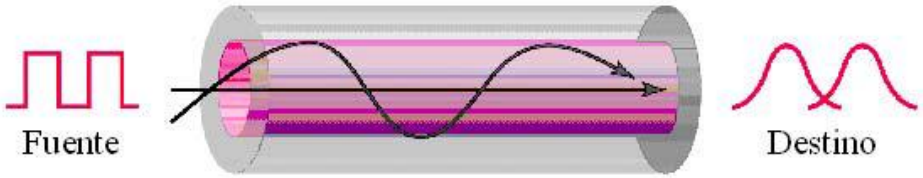


Figura 2.19.- *Fibra multimodo de índice gradual.*

La señal se introduce en el centro del núcleo. A partir de este punto, solamente el rayo horizontal se mueve en línea recta a través de la zona central, de la densidad constante. Los rayos en otros ángulos se mueven a través de una serie de densidades que cambian constantemente. Cada diferencia de densidad hace que el rayo se refracte formando una curva. Además, cambiar la refracción cambia la distancia de cada rayo que viaja en el mismo periodo de tiempo, dando como resultado que los rayos distintos se intersecan a intervalos regulares. Si se sitúa cuidadosamente el receptor en uno de estos intervalos se puede conseguir reconstruir la señal con una precisión mucho mayor.

Monomodo. El monomodo usa fibra de índice escalonado y una fuente de luz muy enfocada que limita los rayos a un rango muy pequeño de ángulos cerca de la horizontal. La **fibra monomodo** se fabrica con un diámetro mucho más pequeño que las fibras multimodo y con una densidad (índice de refracción) sustancialmente menor. El decrecimiento de densidad da como resultado un ángulo crítico que está muy cerca de los 90 grados para hacer que la propagación de los rayos sea casi horizontal. En este caso, la propagación de los distintos rayos es casi idéntica y los retrasos son despreciables. Todos los rayos llegan al destino «juntos» y se pueden recombinar sin distorsionar la señal (véase la figura 2.20).

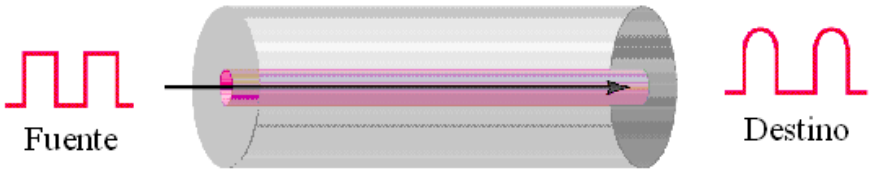


Figura 2.20.- *Fibra monomodo.*

Tamaño de la fibra.

Las fibras ópticas se definen por la relación entre el diámetro de su núcleo y el diámetro de su cubierta, ambas expresadas en mieras (micrómetros). La tabla siguiente muestra los tamaños más frecuentes. El último tamaño de la tabla se usa únicamente para monomodo.

Tipos de fibra

Tipo	Núclo (en micras)	Cubierta (en micras)	Modo
50/125	50.0	125	Multimodo, índice gradual
62.5/125	62.5	125	Multimodo, índice gradual
100/125	100.0	125	Multimodo, índice gradual
7/125	7.0	125	Monomodo

Composición del cable.

La figura 2.21 muestra la composición de un cable típico de fibra óptica. La fibra está formada por un núcleo rodeado por una cubierta. En la mayoría de los casos, la fibra está cubierta por un nivel intermedio que lo protege de la contaminación. Finalmente, todo el cable está encerrado por una carcasa exterior.

Tanto el **núcleo** como la envoltura o revestimiento pueden estar hechos de cristal o plástico, pero deben ser de densidades distintas. Además, el núcleo interior debe ser ultra puro y completamente regular en forma y tamaño. Las diferencias químicas del material, e incluso pequeñas variaciones del tamaño y la forma del canal, alteran el ángulo de reflexión y distorsionan la señal. Algunas aplicaciones pueden admitir cierta distorsión y sus cables pueden ser más baratos, pero otras dependen de que haya una uniformidad completa.

La **envoltura exterior** (o funda) se puede hacer con varios materiales, incluyendo un recubrimiento de teflón, plástico, plástico fibroso, tubería de metal y malla metálica. Cada uno de estos materiales sirve para un propósito distinto. Los plásticos son ligeros y baratos pero no proporcionan fuerza estructural y pueden emitir humos cuando se queman. La tubería de metal proporciona mayor fortaleza pero eleva los costes. El teflón es ligero y se puede usar al aire libre, pero es caro y no incrementa la robustez del cable. La elección del material depende del lugar de instalación del cable.

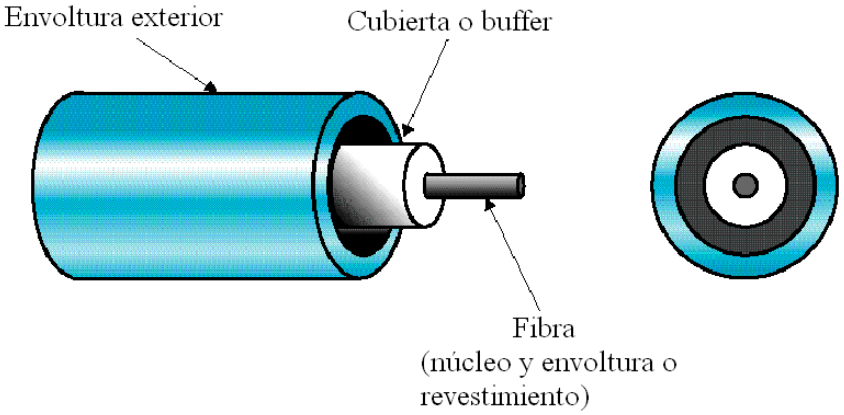


Figura 2.21.- *Construcción de la fibra.*

Fuentes de luz diversas para los cables ópticos

Como se ha visto, el objetivo del cable de fibra óptica es contener y dirigir rayos de luz del origen al destino. Para que haya transmisión, el dispositivo emisor debe estar equipado con una fuente luminosa y el dispositivo receptor con una célula fotosensible (denominada foto-diodo) capaz de traducir la luz recibida en corriente que pueda ser usada en una computadora. La fuente luminosa puede ser bien un **diodo emisor de luz (LED,** *Light Emmitting Diode)* o un diodo de inyección láser (ILD, *Injection Láser Diode).* Los LED son la fuente más barata, pero proporcionan una luz desenfocada que incide en los extremos del canal con ángulos descontrolados y se difumina con la distancia. Por esta razón, el uso de los LED está limitado a distancias cortas.
Por otro lado, los **lásers** se pueden enfocar en un rango muy estrecho, permitiendo el control del ángulo de incidencia. Las señales láser conservan el carácter de la señal en distancias considerables.

Conectores para fibra óptica

Los conectores para el cable de fibra óptica deben ser tan precisos como el cable en sí mismo. Con medios metálicos, las conexiones no necesitan ser tan exactas siempre que ambos conductores estén en contacto físico. Por otro lado, con la fibra óptica cualquier desalineamiento o bien con otro segmento del núcleo o bien con un fotodiodo da como resultado que la señal se refleje hacia el emisor y cualquier diferencia en el tamaño de los dos canales conectados da como resultado un cambio en el ángulo de la señal. Además, la conexión debe completarse aunque las fibras conectadas no estén completamente unidas. Un intervalo entre ambos núcleos da como resultado una señal disipada; una conexión fuertemente presionada puede comprimir ambos núcleos y alterar el ángulo de reflexión.

Teniendo en cuenta estas restricciones, los fabricantes han desarrollado varios conectores que son precisos y fáciles de usar. Todos los conectores populares tienen forma de barril y conectores en versiones macho y hembra. El cable se equipa con un conector macho que se bloquea o conecta con un conector hembra asociado al dispositivo a conectar.

Ventajas de la fibra óptica

La principal ventaja que ofrece el cable de fibra óptica sobre los pares trenzados y el cable coaxial son: inmunidad al ruido, menor atenuación de la señal y ancho de banda mayor.

- **Inmunidad al ruido.** Debido a que las transmisiones por fibra óptica usan luz en lugar de electricidad, el ruido no es importante. La luz externa, la única interferencia posible, es bloqueada por el recubrimiento opaco exterior del canal.
- **Menor atenuación de la señal.** La distancia de transmisión de la fibra óptica es significativamente mayor que la que se consigue en otros medios guiados. Una señal puede transmitirse a lo largo de kilómetros sin necesidad de regeneración.
- **Ancho de banda mayor.** El cable de fibra óptica puede proporcionar anchos de banda (y por tanto tasas de datos) sustancialmente mayores que cualquier cable de par trenzado o coaxial. Actualmente, las tasas de datos y el uso del ancho de banda en cables de fibra óptica no están limitados por el medio, sino por la tecnología disponible de generación y de recepción de la señal.

Desventajas de la fibra óptica

Las principales desventajas de la fibra óptica son el coste, la instalación, el mantenimiento y la fragilidad.

- **Costo.** El cable de fibra óptica es caro. Debido a que cualquier impureza o imperfección del núcleo puede interrumpir la señal, la fabricación debe ser laboriosamente precisa.
  Igualmente, conseguir una fuente de luz láser puede costar miles de dólares, comparado a los cientos de dólares necesarios para los generadores de señales eléctricas.
- **Instalación/mantenimiento.** Cualquier grieta o rozadura del núcleo de un cable de fibra óptica difumina la luz y altera la señal. Todas las marcas deben ser pulidas y fundidas con precisión. Todas las conexiones deben estar perfectamente alineadas y ser coincidentes con el tamaño del núcleo y deben proporcionar uniones completamente acopladas pero sin excesivas presiones. Las conexiones de los medios metálicos, por otro lado, se pueden hacer con herramientas de cortado y de presión relativamente poco sofisticadas.
- **Fragilidad.** La fibra de cristal se rompe más fácilmente que el cable, lo que la convierte en menos útil para aplicaciones en las que es necesario transportar el *hardware.*
- A medida que las técnicas de fabricación han mejorado y los costos se han reducido, las altas tasas de datos y la inmunidad al ruido han hecho de la fibra óptica un medio crecientemente popular.

2.2.- No Guiados:

Los **medios no guiados,** o **comunicaciones sin cable,** transportan ondas electromagnéticas sin usar un conductor físico. En su lugar, las señales se radian a través del aire (o, en unos pocos casos, el agua) y, por tanto, están disponibles para cualquiera que tenga un dispositivo capaz de aceptarlas.

La sección del espectro electromagnético definido como comunicación de radio se divide en ocho rangos, denominados bandas, cada una de ellas reguladas por las autoridades gubernamentales. Estas bandas se clasifican desde frecuencia muy baja (VLF, *Very Low Frequency)* a frecuencia extremadamente alta (EHF, *Extremely High Frequency).* La figura 2.22 muestra las ocho bandas y sus acrónimos.

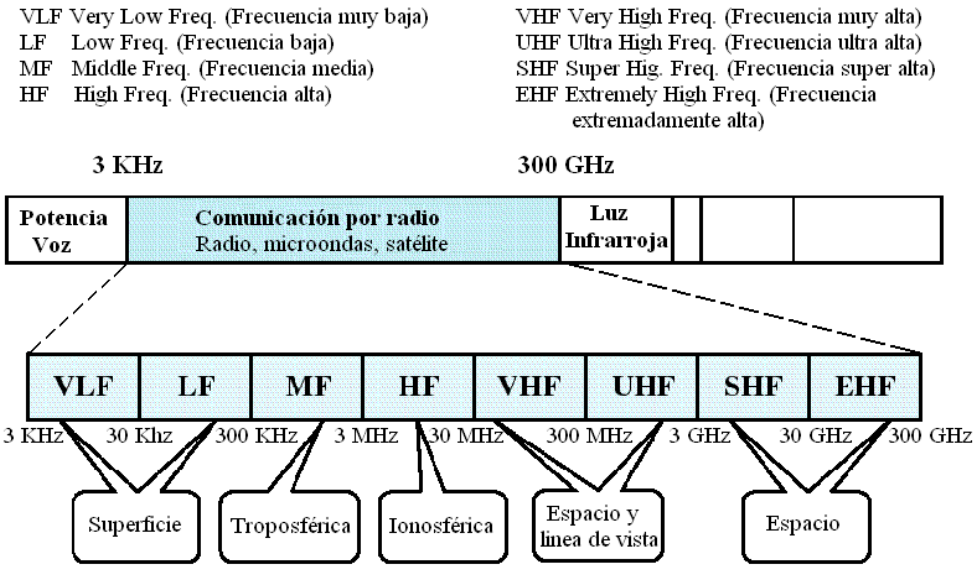


Figura 2.22.- *Bandas de comunicación por radio.*

RADIOFRECUENCIA ó Transmisión de señales de radio.

La transmisión de **ondas de radio** utiliza cinco tipos de propagación distintos: superficie, troposférica, ionosférica, línea de visión y espacio (véase la figura 2.23).

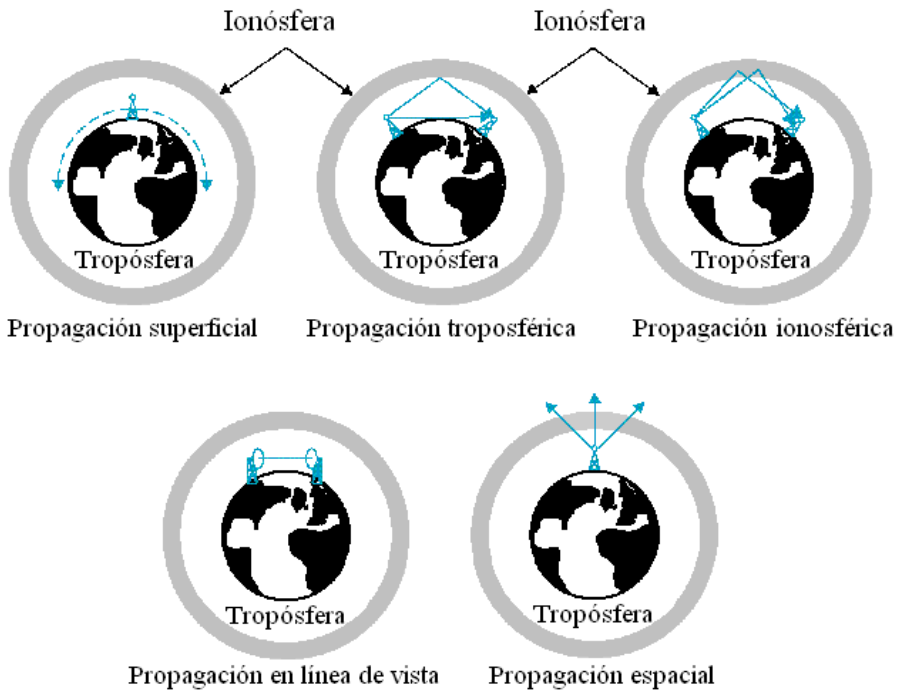


Figura 2.23.- *Tipos de propagación.*

La tecnología de radio considera que la tierra está rodeada por dos capas de atmósfera: la troposfera y la ionosfera. La **troposfera** es la porción de la atmósfera que se extiende hasta aproximadamente 45 km desde la superficie de la tierra (en terminología de radio, la troposfera incluye una capa de máxima altitud denominada estratosfera) y contiene aquello en lo que nosotros generalmente pensamos como el aire. Las nubes, el viento, las variaciones de temperatura y el clima en general ocurren en la troposfera, al igual que los viajes de avión. La **ionosfera** es la capa de atmósfera por encima de la troposfera pero por debajo del espacio. Está más allá de lo que nosotros denominamos atmósfera y contiene partículas libres cargadas eléctricamente (de aquí el nombre).

Propagación en superficie. En la propagación en superficie, las ondas de radio viajan a través de la porción más baja de la atmósfera, abrazando a la tierra. A las frecuencias más bajas (menos de 2 Mhz), las señales emanan en todas las direcciones desde la antena de transmisión y sigue la curvatura del planeta. La distancia depende de la cantidad de potencia en la señal: cuanto mayor es la potencia, mayor es la distancia. La propagación en superficie también puede tener lugar en el agua del mar.

Propagación troposférica. La propagación troposférica puede actuar de dos formas. O bien se puede dirigir la señal en línea recta de antena a antena (visión directa) o se puede radiar con un cierto ángulo hasta los niveles superiores de la troposfera donde se refleja hacia la superficie de la tierra. El primer método necesita que la situación del receptor y el transmisor esté dentro de distancias de visión, limitadas por la curvatura de la tierra en relación a la altura de las antenas. El segundo método permite cubrir distancias mayores.

Propagación ionosférica. En la propagación ionosférica, las ondas de radio de más alta frecuencia (2 a 30 Mhz) se radian hacia la ionosfera donde se reflejan de nuevo hacia la tierra. La densidad entre la troposfera y la ionosfera hace que cada onda de radio se acelere y cambie de dirección, curvándose de nuevo hacia la tierra. Este tipo de transmisión permite cubrir grandes distancias con menor potencia de salida.

Propagación por visión directa. En la propagación por visión directa, se transmiten señales de muy alta frecuencia (más de 30 Mhz) directamente de antena a antena siguiendo una línea recta. Las antenas deben ser direccionales, estando enfrentadas entre sí, y o bien están suficientemente altas o suficientemente juntas para no verse afectadas por la curvatura de la tierra. La propagación por visión directa es compleja porque las transmisiones de radio no se pueden enfocar completamente. Las ondas emanan hacia arriba y hacia abajo así como hacia delante y pueden reflejar sobre la superficie de la tierra o partes de la atmósfera. Las ondas reflejadas que llegan a la antena receptora más tarde que la porción directa de la transmisión puede corromper la señal recibida.

Propagación por el espacio. La propagación por el espacio utiliza como retransmisor satélites en lugar de la refracción atmosférica. Una señal radiada es recibida por un satélite situado en órbita, que la reenvía de vuelta a la tierra para el receptor adecuado. La transmisión vía satélite es básicamente una transmisión de visión directa con un intermediario (el satélite). La distancia al satélite de la tierra es equivalente a una antena de súper alta ganancia e incrementa enormemente la distancia que puede ser cubierta por una señal.

Propagación de señales específicas

El tipo de propagación que se usa en la radio-transmisión depende de la frecuencia de la señal. Cada frecuencia es adecuada para una capa específica de la atmósfera y es más eficiente si se transmite y se envía con tecnologías adaptadas a la capa.

VLF. Las **ondas de frecuencia muy baja (VLF,** *Very Low Frequency)* se propagan como ondas de superficie, habitualmente a través del aire, pero algunas veces a través del agua del mar. Las ondas VLF no sufren mucha atenuación debido a la transmisión, pero son sensibles a los altos niveles de ruido atmosférico (calor y electricidad) activo en bajas altitudes. Las ondas VLF se usan principalmente para radio-navegación de largo alcance y para comunicación submarina (véase la figura 2.24).

Figura 2.24.- *Rango de frecuencias para VLF.*

LF. De forma similar al VLF, las ondas de **baja frecuencia (LF,** *Low Frequency)* se propagan también como ondas de superficie. Las ondas LF se usan para radio-navegación de largo alcance y para las radio balizas o localizadores de navegación (véase la figura 2.25). La atenuación es mayor durante el día, cuando se incrementa la absorción de las ondas por los obstáculos naturales.

Figura 2.25.- *Rango de frecuencias LF.*

MF. Las señales de **frecuencia media (MF,** *Middle Frequency)* se propagan en la troposfera. Estas frecuencias son absorbidas por la ionosfera. Por tanto, la distancia que pueden cubrir está limitada por el ángulo necesario para reflejar la señal en la troposfera sin entrar en la ionosfera. La absorción se incrementa durante el día, pero la mayoría de las transmisiones MF se efectúan con antenas de visión directa para incrementar el control y evitar también los problemas de absorción. Los usos de las transmisiones MF incluyen radio AM, radio marítima, buscadores audiodireccionales (RDF) y frecuencias de emergencia (véase la figura 2.26).

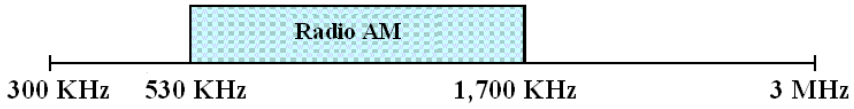


Figura 2.26.- *Rango de frecuencias MF.*

HF. Las señales de **frecuencia alta (HF,** *High Frequency)* usan propagación ionosférica. Estas señales se desplazan dentro de la ionosfera, donde la diferencia de densidad las refleja de nuevo hacia la tierra. Los usos de señales HF incluyen los radioaficionados (ham radio), la radio de bandas de ciudadanos (CB), las emisiones internacionales, comunicaciones militares, comunicación de larga distancia para aviones y barcos, teléfonos, telégrafos y faxes (véase la figura 2.27).

Figura 2.27.- *Rango de frecuencias de HF.*

VHF. La mayoría de las ondas de **frecuencia muy alta (VHF,** *Very High Frequency)* usan propagación de visión directa. Los usos del VHF incluyen la televisión VHF, la radio FM, la radio AM de los aviones y la ayuda de navegación de los aviones (véase la figura 2.28).

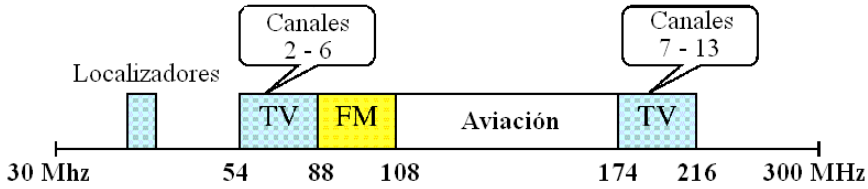


Figura 2.28.- *Rango de frecuencias para VHF.*

UHF. Las ondas de **frecuencia ultra alta (UHF,** *Ultra High Frequency)* siempre se usan en propagación de visión directa. Los usos para el UHF incluyen la televisión UHF, los teléfonos móviles, la radio celular, los buscadores y los enlaces de microondas (véase la figura 2.29). Observe que la comunicación con microondas comienzan en la frecuencia 1 GHz de la banda UHF y continúa hasta las bandas SHF y EHF.

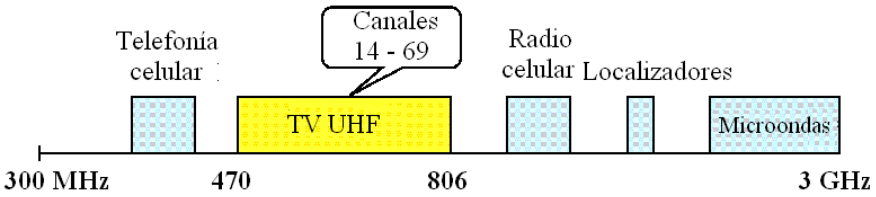


Figura 2.29.- *Rango de frecuencias para UHF.*

SHF. Las ondas de **frecuencia súper alta (SHF,** *Super High Frequency)* se transmiten usando principalmente propagación por visión directa y algo de propagación espacial. Los usos del SHF incluyen las microondas terrestres y satélite y la comunicación radar (véase la figura 2.30).

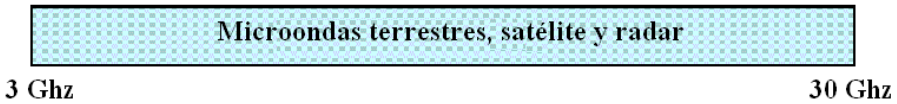


Figura 2.30.- *Rango de frecuencias para SHF.*

EHF. Las ondas de **frecuencia extremadamente alta (EHF,** *Extremely High Frequency)* usan la propagación espacial. Los usos para el EHF son predominantemente científicos e incluyen radar, satélite y comunicaciones experimentales (véase la figura 2.31). La tabla siguiente resume las diferentes bandas y sus características de propagación.

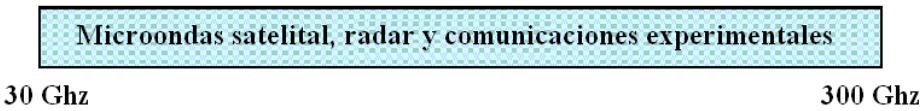


Figura 2.31.- *Rango de frecuencias para SHF.*

Banda	Rango de frecuencias	Rango de longitudes de onda en el espacio libre	Características de propagación	Uso típico
Frecuencias extremadamente bajas (ELF, *Extremely Low Frequency)*	30 a 300 Hz	10.000 a 1.000 km	Superficial	Líneas de potencia; se utilizan en algunos sistemas de control domésticos
Frecuencias de voz (VF, *Voice Frequency)*	300 a 3.000 Hz	1.000 a 100 km	Superficial	Se usan en los bucles de abonado de los sistemas de telefonía
Frecuencias muy bajas (VLF, *Very Low Frequency)*	3 a 30 kHz	100 a 10 km	Superficial con baja atenuación diurna y nocturna; alto nivel de ruido atmosférico	Navegación en alta mar; comunicaciones submarinas
Frecuencias bajas (LF, *Low Frequency)*	30 a 300 kHz	10 a 1 km	Superficial; ligeramente menos fiable que VLF; absorción diurna	Navegación en alta mar; radiolocalización para comunicaciones marinas
Frecuencias medias (MF, *Médium Frequency)*	300 a 3.000 kHz	1.000 a 100 m	Superficial y ionosférica nocturna; baja	Radio marítima; búsqueda de direcciones;

			atenuación nocturna, siendo alta la diurna; ruido atmosférico	radiodifusión AM
Frecuencias altas (HF, *High Frequency)*	3 a 30 MHz	100 a 10 m	Ionosférica; la calidad varía a lo largo del día, con las estaciones y la frecuencia	Radioaficionados; radiodifusión internacional; comunicaciones militares; navegación aérea de larga distancia y comunicaciones marítimas
Frecuencias muy altas (VHF, *Very High Frequency)*	30 a 300 MHz	10 a 1 m	Línea de vista; dispersión debido a la inversión de temperaturas; ruido cósmico	Televisión VHF; radiodifusión FM, comunicaciones AM en aviones; ayudas a la navegación de aviones
Frecuencias ultra altas (UHF, *Ultra High Frequency)*	300 a 3.000 MHz	100 a 10 cm	Línea de vista; ruido cósmico	Televisión UHF; telefonía celular; radar; enlaces de microondas; sistemas de comunicación personal
Frecuencias super altas (SHF, *Super High Frequency)*	3 a 30 GHz	10 a 1 cm	Línea de vista; la lluvia atenúa por encima de 10 GHz; atenuación atmosférica debido al vapor de agua y al oxígeno	Comunicaciones satelitales; radar; enlaces de microondas terrestres; bucles locales inalámbricos
Frecuencias extremadamente altas (EHF, *Extremely High Frequency)*	30 a 300 GHz	10 a 1 mm	Línea de vista; atenuación atmosférica debido al vapor de agua y al oxígeno	Experimental; bucles locales inalámbricos
Infrarrojos	300 GHz a 400 THz	1 a 770 nm	Línea de vista	LAN infrarrojas; aplicaciones de electrónica de consumo
Luz visible	400 a 900 THz	700 a 330 nm	Línea de vista	Comunicaciones ópticas

MICROONDAS (en el espacio libre):

El mundo de las comunicaciones está basado en la transmisión de información mediante ondas electromagnéticas entre un emisor y un receptor. Fundamentalmente podemos dividir esta transmisión en dos tipos fundamentales:

- A través de un cable o guía de ondas.
- Radiación de OEM a través del aire, el espacio libre o de un medio dieléctrico.

La búsqueda de canales con baja atenuación y la necesidad de enviar señales con un ancho de banda cada vez mayor ha hecho que las guías de onda, que no se incluyen en este libro, juegan un papel cada vez más importante en del conjunto de medios físicos para la comunicación. La televisión por cable, la telefonía, Internet, etc. obligan a un uso cada vez mayor de guías de onda, en particular de fibras ópticas. Se llama guía de onda a cualquier estructura, o parte de una estructura, que hace que una onda electromagnética se propague en una dirección determinada, con algún grado de confinamiento en el plano transversal a la dirección de propagación. En esta sección trataremos la transmisión de ondas electromagnéticas en el espacio libre, o sea, que no están confinadas en un espacio reducido.

Las **microondas** terrestres no siguen la curvatura de la tierra y por tanto necesitan equipo de transmisión y recepción por visión directa. La distancia que se puede cubrir con una señal por visión directa depende principalmente de la altura de la antena: cuanto más altas sean las antenas, más larga es la distancia que se puede ver. La altura permite que la señal viaje más lejos sin ser interferida por la curvatura del planeta y eleva la señal por encima de muchos obstáculos de la superficie, como colinas bajas y edificios altos que de otra forma bloquearían la transmisión. Habitualmente, las antenas se montan sobre torres que a su vez están construidas sobre colinas o montañas.

Las señales de microondas se propagan en una dirección concreta, lo que significa que hacen falta dos frecuencias para una comunicación en dos sentidos, como por ejemplo una conversación telefónica. Una frecuencia se reserva para la **transmisión por microondas** en una dirección y la otra para la transmisión en la otra. Cada frecuencia necesita su propio transmisor y receptor. Actualmente, ambas partes del equipo se combinan habitualmente en un equipo denominado transceptor, lo que permite usar una única antena para dar servicio a ambas frecuencias y funciones.

Repetidores:
Para incrementar la distancia útil de las **microondas terrestres,** se puede instalar un sistema de repetidores con cada antena. La señal recibida por una antena se puede convertir de nuevo a una forma transmisible y entregarla a la antena siguiente (véase la figura 4.31). La distancia mínima entre los repetidores varía con la frecuencia de la señal y el entorno en el cual se encuentran las antenas. Un repetidor puede radiar la señal regenerada a la frecuencia original o con una Hueva frecuencia, dependiendo del sistema.

Las microondas terrestres con repetidores constituyen la base de la mayoría de los sistemas de telefonía contemporánea alrededor del mundo.

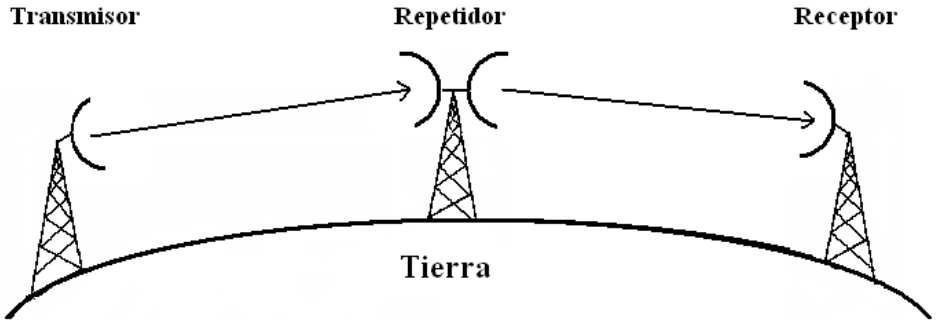
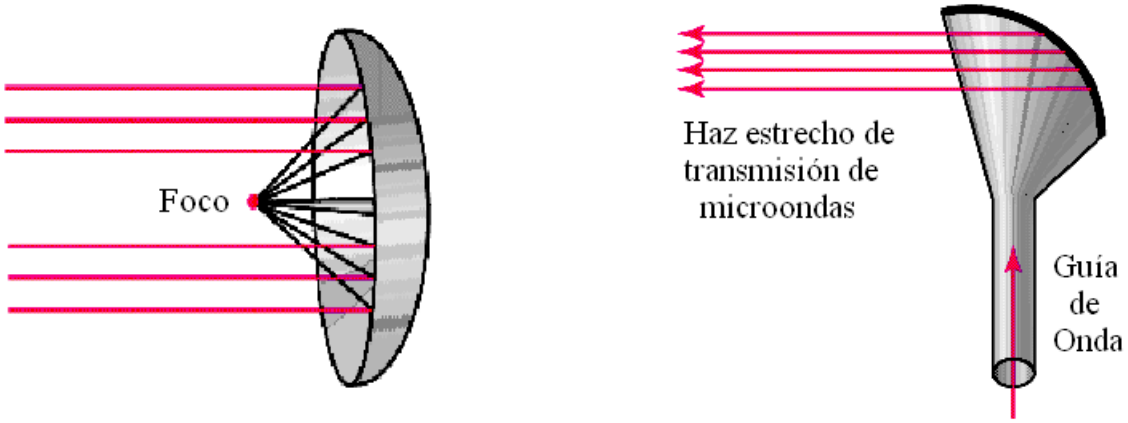


Figura 2.32.- *Microondas terrestres.*

Antenas:
Para las comunicaciones con microondas terrestres se usan dos tipos de antenas: parabólicas y de cornete (véase la figura 2.33).

Una **antena parabólica** se basa en la geometría de una parábola: cada línea paralela a la línea de simetría (línea de vista) refleja la curva en ángulos tales que inciden en un punto común denominado foco. El plato parabólico funciona como un embudo, capturando un amplio rango de ondas y dirigiéndolas a un punto común. De esta forma, se recupera más señal de lo que sería posible con un receptor de punto único.

Las transmisiones de salida se radian a través de un cornete apuntado al disco. Las microondas golpean el disco y son deflexionadas hacia fuera en sentido contrario al camino de recepción.



Antena parabólica. *Antena de cornete.*

Figura 2.33.- *Tipos de antenas.*

Una **antena de cornete** se parece a una cuchara gigante. Las transmisiones de salida son radiadas hacia arriba de un mástil (que se parece al mango) y deflexionadas hacia fuera en una serie de estrechos haces paralelos mediante la cabeza curvada.

Las transmisiones recibidas son recolectadas por la forma de cuchara del cornete, de forma similar a la antena parabólica, y son deflexionadas mástil abajo.

SATELITE:

Las transmisiones vía satélite se parecen mucho más a las transmisiones con microondas por visión directa en la que las estaciones son satélites que están orbitando la tierra. El principio es el mismo que con las microondas terrestres, excepto que hay un satélite actuando como una antena súper alta y como repetidor (véase la figura 2.34). Aunque las señales que se transmiten vía satélite siguen teniendo que viajar en línea recta, las limitaciones impuestas sobre la distancia por la curvatura de la tierra son muy reducidas. De esta forma, los satélites retransmisores permiten que las señales de microondas se puedan transmitir a través de continentes y océanos con un único salto.

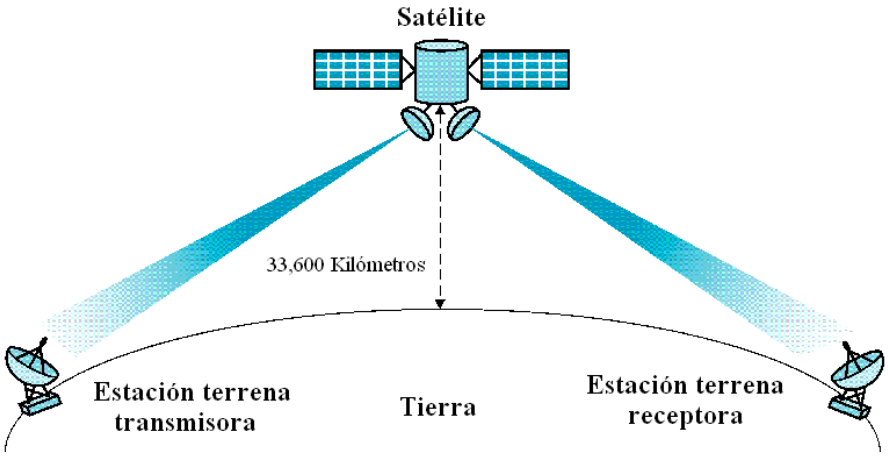


Figura 2.34.- *Comunicación vía satélite.*

Las microondas vía satélite pueden proporcionar capacidad de transmisión a y desde cualquier localización en la tierra, sin importar lo remota que esta sea. Esta ventaja hace que las comunicaciones de alta calidad estén disponibles en lugares no desarrollados del mundo sin necesidad de hacer grandes inversiones en infraestructura de tierra. Por supuesto, los satélites en sí mismos son extremadamente caros, pero alquilar tiempo o frecuencias de uno de ellos puede ser relativamente barato.

Satélites geoestacionarios:
La propagación por línea de vista necesita que las antenas emisoras y receptoras estén fijas/estáticas con respecto a la localización de las demás en todo momento (una antena debe poder ver a la otra). Por esta razón, un satélite que se mueve más deprisa o más despacio que la rotación de la tierra es útil únicamente para periodos de tiempo cortos (de la misma forma que un reloj parado solamente es exacto dos veces al día). Para asegurar una comunicación constante, el satélite debe moverse a la misma velocidad que la tierra de forma que parezca que está fijo en un cierto punto. Estos satélites se llaman geosincrónicos.o geoestacionarios.

Debido a que la velocidad orbital depende de la distancia desde el planeta, solamente hay una órbita que puede ser geosincrónica. Esta órbita se produce en el plano ecuatorial y está aproximadamente a 36.000 kilómetros de la superficie de la tierra.

Pero un único satélite geosincrónico no puede cubrir toda la tierra. Un satélite en órbita tiene contacto por línea de vista con un gran número de estaciones, pero la curvatura de la tierra sigue haciendo que gran parte del planeta todavía no se pueda ver. Por ello, es necesario tener un mínimo de tres satélites equidistantes entre sí en **órbita geosincrónica** para proporcionar una transmisión global completa.

La figura 2.35 muestra tres satélites, separados 120 grados entre sí en una órbita geosincrónica alrededor del ecuador. Es una vista desde el Polo Norte.

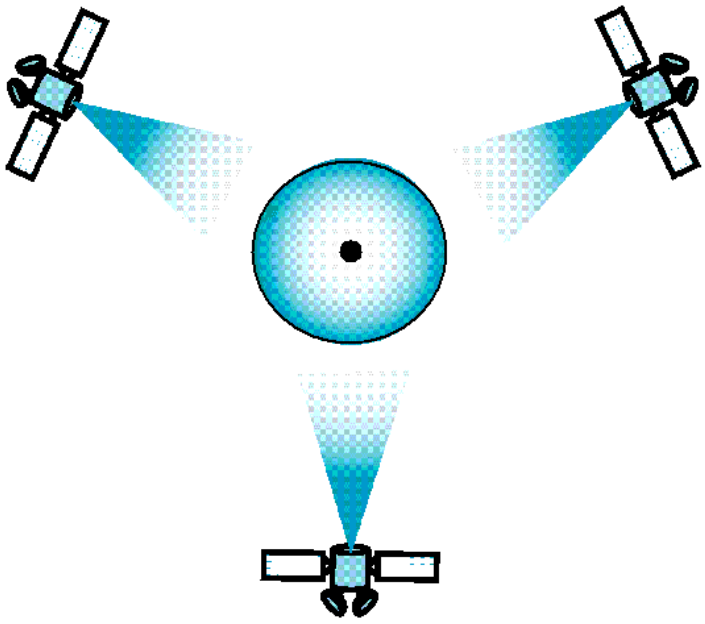


Figura 2.35.- *Satélites geoestacionarios.*

Bandas de frecuencia para comunicación por satélite

Las frecuencias reservadas para la comunicación por microondas vía satélite están en el rango de los gigahertz (GHz). Cada satélite envía y recibe dos bandas distintas. La transmisión desde la tierra al satélite se denomina **enlace ascendente.** La transmisión desde el satélite a la tierra se denomina **enlace descendente.** La tabla siguiente muestra los nombres de las bandas de frecuencias para cada rango.

Banda	Enlace descendente (GHz)	Enlace ascendente (GHz)	Problemas
C	3.7 – 4.2	5.925 – 6.425	Interferencia Terrestre
Ku	11.7 – 12.2	14.0 – 14.5	Lluvia
Ka	17.7 – 21.7	27.5 – 30.5	Lluvia

Los satélites comerciales funcionan en tres bandas de frecuencias, llamadas C, Ku y Ka. La gran mayoría de emisiones de televisión por satélite se realizan en la banda Ku.

No es conveniente poner muy próximos en la órbita geoestacionaria dos satélites que funcionen en la misma banda de frecuencias, ya que pueden interferirse. En la banda C la distancia mínima es de dos grados, en la Ku y la Ka de un grado. Esto limita en la práctica el número total de satélites que puede haber en toda la órbita geoestacionaria a 180 en la banda C y a 360 en las bandas Ku y Ka. La distribución de bandas y espacio en la órbita geoestacionaria se realiza mediante acuerdos internacionales.

INFRARROJO:

Las comunicaciones infrarrojas están basadas en el principio de la luz infrarroja, que es una radiación electromagnética cuya frecuencia la hace invisible al ojo humano, La luz visible viaja en haces de luz que van desde los 400 ángstroms, violeta oscuro, a 700 ángstroms, rojo oscuro. Las frecuencias del infrarrojo son de 700 a 1,000 ángstroms. Conforme a los estándares del IrDA la mayoría de las computadoras personales y equipo de comunicaciones se mantienen entre los 850 y 900 ángstroms.

Los rayos infrarrojos son un tipo de luz que no podemos ver con nuestros ojos. Nuestros ojos pueden solamente ver lo que llamamos luz visible. La luz infrarroja nos brinda información especial que no podemos obtener de la luz visible. Los rayos infrarrojos abarcan aproximadamente desde los 30 x 10^{11} Hz (300 GHz) hasta los 3.8 x 10^{14} Hz (380 THz). Cualquier molécula cuya temperatura sea superior a 0º Kelvin (cero absoluto, equivalente a –273º C), emite rayos infrarrojos. Esa emisión se incrementa a medida que las moléculas que integran un cuerpo cualquiera adquieren mayor temperatura.

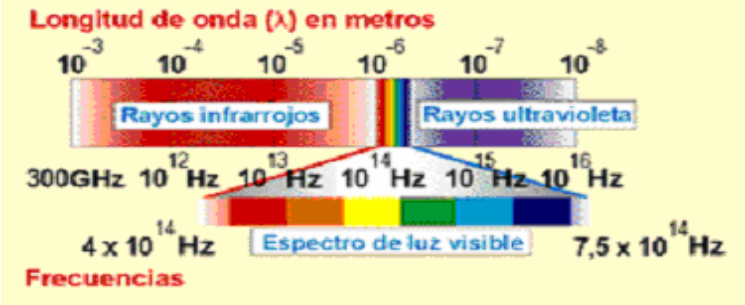


Figura 2.36.- *Rayos infrarrojos (IR), los rayos de luz visible y rayos ultravioleta (UV).*

Por ejemplo, es posible que un trozo de carbón encendido no emita luz visible, pero que sí emita la radiación infrarroja que sentimos como calor. Mientras más caliente se encuentre un objeto, tanta más radiación infrarroja emitirá. A la temperatura normal del cuerpo, la mayoría de las personas irradian más intensamente en el infrarrojo, con una longitud de onda de 10 micrones (millonésima de metro). En la oscuridad los detectores de infrarrojos pueden ver objetos que no son posibles ver a luz visibles gracias a que dichos objetos irradian calor.

En una foto de la Tierra tomada desde un satélite empleando para ello tecnología de rayos infrarrojos, se pueden diferenciar zonas de diferentes colores. Por medio de esos colores se puede conocer la temperatura ambiente existente en esos momentos en cada zona específica de una zona geográfica fotografiada.

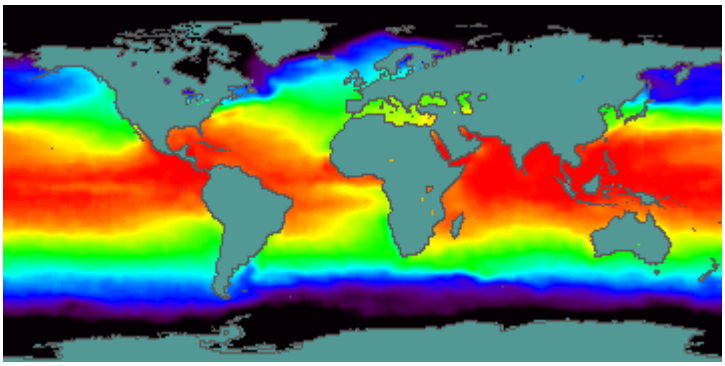


Figura 2.37.- *Imagen Infrarroja de la tierra.*

Los rayos infrarrojos de baja potencia se utilizan para accionar diferentes dispositivos de control remoto como, por ejemplo, el mando de los televisores, intercomunicación entre equipos y computadoras, visión nocturna, fotografía nocturna, etc., mientras que los de alta potencia se emplean para generar calor.

Los rayos infrarrojos tienen una longitud de onda cercana a la de la luz y, por lo tanto, con un comportamiento similar, tanto en sus ventajas como en sus inconvenientes. Entre estas características, la más evidente es que no pueden atravesar objetos sólidos como paredes, lo que supone un serio freno a su capacidad de difusión. Bien es cierto que no hay mal que por bien no venga y esta misma limitación supone un seguro contra receptores no deseados. También, debido a su alta frecuencia, presentan una fuerte resistencia a las interferencias electromagnéticas artificiales radiadas por otros dispositivos, pudiendo, además, alcanzar grandes velocidades de transmisión; de hecho, se han desarrollado sistemas que operan a 100 Mbps.

En cuanto a las restricciones de uso, la transmisión por rayos infrarrojos no requiere autorización especial en ningún país, excepto por los organismos de salud que limitan la potencia de la señal transmitida. Por último, y como atractivo señuelo a todo tipo de fabricantes, utiliza componentes sumamente económicos y de bajo consumo energético, importantes características muy a tener en cuenta en aquellos dispositivos que deban formar parte de equipos móviles portátiles.

Entre las limitaciones principales, cabe decir que resultan sumamente sensibles a objetos móviles que interfieren y perturban la comunicación entre emisor y receptor. Además, las restricciones en la potencia de transmisión limitan la cobertura de estas redes a unas cuantas decenas de metros, y lo que aún más grave, la luz solar directa, las lámparas incandescentes y otras fuentes de luz brillante pueden interferir seriamente la señal.

En el balance final sobre ventajas e inconvenientes, los pocos sistemas de comunicación que emplean como medio de transmisión la luz infrarroja están limitadas por el espacio, utilizándose casi en exclusividad en comunicaciones en las que los distintos dispositivos se encuentran en un sólo cuarto o área, escenario que normalmente se presenta en el entorno casero. No obstante, algunas compañías que tienen sus oficinas en varios edificios realizan la comunicación colocando los receptores/emisores en las ventanas de los edificios.

En resumen, a pesar de sus buenas cualidades y características, la gran influencia del entorno representa un enorme obstáculo a la fiabilidad de las comunicaciones y, por tanto, reduce sus posibilidades de implantación masiva. De hecho, salvo la inclusión de los sistemas por infrarrojos incorporados a la mayoría de las computadoras portátiles y periféricos como impresoras, cámaras digitales o PDA que siguen la norma IrDA, son contados y exclusivos los productos que implementan dicha tecnología.

El conjunto de especificaciones que actualmente constituyen el la norma internacional para el desarrollo de sistemas de comunicaciones a través de rayos infrarrojos adopta el mismo nombre de la asociación que los produce: IrDA, del ingles "Infrared Data Association, IrDA", la cuál está patrocinada por más de 160 industrias y fue establecida en 1993 con el objetivo de crear las especificaciones y estándares para los equipos y protocolos empleados en este tipo de enlaces.
En esta forma especial de transmisión de radio, un haz enfocado de luz en el espectro de frecuencia infrarrojo, medido en terahertz o billones de hertzios (ciclos por segundo) se modula con información y se envía de un transmisor a un receptor a una distancia relativamente corta. La radiación infrarroja (IR) es la misma tecnología usada para controlar un televisor con control a distancia.

Entre sus usos o posibilidades razonables está enviar un documento de nuestra computadora portátil a una impresora, intercambiar tarjetas de visita, coordinar agendas y libretas telefónicas entre nuestras computadoras de escritorio y portátiles o PDA, enviar faxes desde nuestra computadora portátil a una máquina de fax distante usando un teléfono público, cámaras digitales que pueden enviar las imágenes a nuestro ordenador, etc.

La comunicación infrarroja involucra un transceptor (una combinación de transmisor y receptor) en los dos dispositivos que se comunican. Hay microchips especiales que proporcionan esta capacidad. Adicionalmente, uno o ambos dispositivos pueden requerir software especial para que la comunicación pueda sincronizarse. Un ejemplo es el soporte especial para IR en el sistema operativo Windows 95 de Microsoft. En el estándar IrDA-1.1, el máximo tamaño de datos que se pueden transmitir es de 2,048 bytes y la tasa máxima de transmisión es de 4 Mbps.

La IR también puede usarse para interconexiones un tanto más largas y se consideró como una posibilidad para las interconexiones en redes de área local (LAN). La distancia efectiva máxima es algo menor a los ocho kilómetros y el máximo ancho de banda proyectado es de 16 megabits por segundo. Dado que la IR es transmisión en línea visual (ambos dispositivos deben poder "verse" entre sí), es sensible a la niebla y otras condiciones atmosféricas.

La comunicación de datos por infrarrojos ha jugado un importante papel en las comunicaciones de datos inalámbricas debido a la popularidad de las computadoras portátiles, PDA, cámaras digitales, teléfonos celulares, radio localizadores y otros dispositivos. Sin embargo en la actualidad está siendo desplazada por tecnologías más potentes como Bluetooth o Wi-Fi (vea figura 2.38).

Figura 2.38.- *Comunicación de datos inalámbricas.*

2.3.- Métodos para la detección y corrección de errores:

Las redes deben ser capaces de transferir datos desde un dispositivo a otro con una exactitud total. Un sistema que no puede garantizar que los datos recibidos de un dispositivo son idénticos a los transmitidos por otro es esencialmente inútil. Sin embargo, siempre que se transmiten datos de un origen a un destino, se pueden corromper por el camino. De hecho, es más probable que buena parte del mensaje se vea alterado en el tránsito que todos los contenidos lleguen intactos. Muchos factores, incluyendo el ruido de la línea, pueden alterar o eliminar uno o más bits de una unidad de datos determinada. Los sistemas fiables deben tener mecanismos para detectar y corregir tales **errores.**

La detección y corrección de errores se implementa bien a nivel de enlace de datos o a nivel de transporte del modelo OSI.

Tipos de errores:

Siempre que una señal electromagnética fluye de un punto a otro, está sujeta a interferencias impredecibles debidas al calor, el magnetismo y diversas formas de electricidad. Esta interferencia puede cambiar la forma o la temporización de la señal. Si la señal transporta datos binarios codificados, tales cambios pueden alterar el significado de los datos. Cuando existe un error de bit, se cambia un 0 por un 1 o un 1 por un 0. En un error de ráfaga, se cambian múltiples bits. Por ejemplo, una ráfaga de ruido de impulso de 0.01 segundo en una transmisión con una tasa de datos de 1,200 bps podría cambiar todos o parte de 12 bits de información (véase la figura 2.39).

Figura 2.39.- *Tipos de errores.*

Error de bit

El término **error de bit** significa que únicamente un bit de una unidad de datos determinada (tal como byte, carácter, unidad de datos o paquete) cambia de 1 a 0 o de 0 a 1.

La figura 2.40 muestra el efecto de un error de bit de una unidad de datos. Para comprender el impacto de este cambio, imagine que cada grupo de 8 bits es un carácter ASCII con un 0 añadido a la izquierda. En la figura, se ha enviado el carácter 00000010 (ASCII STX), que indica *comienzo del texto,* pero se ha recibido 00001010 (ASCII LF), que significa *salto de línea.*

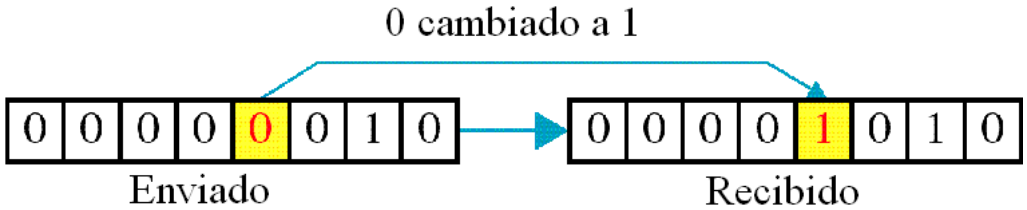


Figura 2.40.- *Error de bit.*

Los errores en un único bit son el tipo de error menos probable en una transmisión de datos en serie. Para ver por qué, imagine que un emisor envía datos a 1 Mbps. Esto significa que cada bit dura únicamente 1/1,000,000 segundos, o 1 μs. Para que ocurra un error de bit, el ruido debe tener una duración de solo 1 μs, lo que es muy raro; normalmente el ruido dura mucho más que esto. Sin embargo, puede ocurrir un error de bit si se están enviando datos usando transmisión paralela. Por ejemplo, si se usan ocho cables para enviar los ocho bit de un byte al mismo tiempo y uno de los cables es ruidoso, se puede corromper un bit de cada byte. Por ejemplo, piense en la transmisión paralela existente dentro de una computadora, entre la CPU y la memoria.

Error de ráfaga

El término **error de ráfaga** significa que dos o más bits de la unidad de datos han cambiado de 1 a 0 o de 0 a 1. La figura 2.41 muestra el efecto de un error de ráfaga sobre una unidad de datos. En este caso, se ha enviado 0100010001000011, pero se ha recibido 0101110101000011. Observe que un error de ráfaga no significa necesariamente que los errores se produzcan en bits consecutivos.

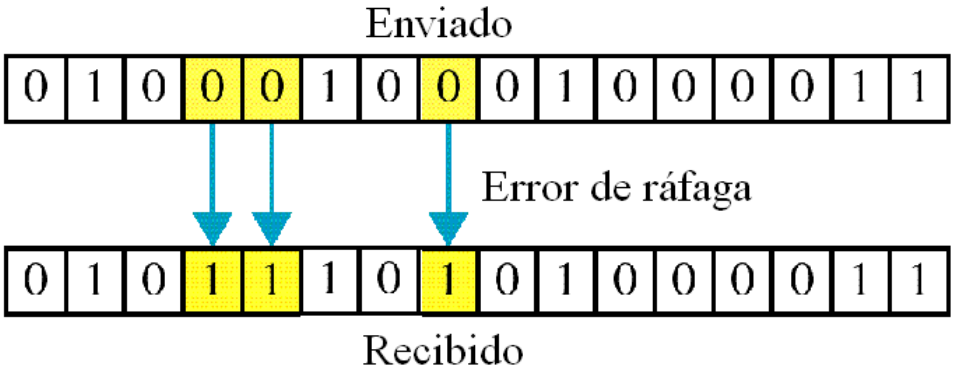


Figura 2.41.- *Error de ráfaga de longitud cinco.*

La longitud de la ráfaga se mide desde el primero hasta el último bit correcto. Algunos bits intermedios pueden no ser corruptos. La presencia de errores de ráfaga es más probable en las transmisiones serie. La duración del ruido es normalmente mayor que la duración de un bit, lo que significa que cuando el ruido afecta a los datos, afecta a un conjunto de bits. El número de bits afectados depende de la tasa de datos y la duración del ruido. Por ejemplo, si se está enviando datos a 1 Kbps, un ruido de 1/100 segundos puede afectar a 10 bits; si se envían datos a 1 Mbps, el mismo ruido podrían afectar a 10,000 bits.

Detección de errores:

Incluso si se conoce qué tipo de errores pueden existir, ¿seremos capaces de reconocer uno cuando lo veamos? Si existe una copia de lo que se quería transmitir para poder comparar, por supuesto que seríamos capaces. Pero, ¿qué ocurre si no tenemos una copia del original? En ese caso no hay forma de saber si se ha recibido un error hasta que se ha decodificado la transmisión y se ve que no tiene sentido. Que una máquina comprobara los errores de esta forma sería lento, costoso y de un valor cuestionable. No es necesario tener un sistema en el cual las computadoras decodifiquen todo lo que llega, luego se sienten decidiendo si el emisor realmente quería usar la *palabra glbrshnifen* medio de un conjunto de estadísticas del tiempo. Lo que necesitamos es un mecanismo que sea sencillo y completamente objetivo.

Redundancia

Un mecanismo de **detección de errores** que satisfaría estos requisitos sería enviar dos veces cada unidad de datos. El dispositivo receptor sería entonces capaz de hacer una comparación bit a bit entre ambas versiones de los datos. Cualquier discrepancia indicaría un error y se podría corregir mediante un mecanismo apropiado. Este sistema sería completamente exacto (las probabilidades de introducir errores exactamente en los mismos bits de ambas copias serían infinitesimalmente pequeñas), pero también sería insoportablemente lento. No solamente se doblaría el tiempo necesario para la transmisión, sino que además habría que añadir el tiempo necesario para comparar cada unidad bit a bit.

El concepto de inclusión de información extra en la transmisión con el único propósito de comparar es bueno. Pero en lugar de repetir todo el flujo de datos, se puede añadir un grupo más pequeño de bits al final de cada unidad. Esta técnica se denomina **redundancia** porque los bits extra son redundantes a la información; se descartan tan pronto como se ha comprobado la exactitud de la transmisión.

La figura 2.42 muestra el proceso de uso de los bits redundantes para comprobar la exactitud de una unidad de datos. Una vez que se ha generado el flujo de datos, se pasa a través de un dispositivo que lo analiza y le añade un código redundante codificado apropiadamente. La unidad de datos, ahora alargada con varios bits (siete en la ilustración) viaja por el enlace hasta el receptor. El receptor pasa todo el flujo a través de una función de comprobación. Si el flujo de bits recibido pasa los criterios de comprobación, la porción de datos de la unidad de datos se acepta y los bits redundantes son descartados.

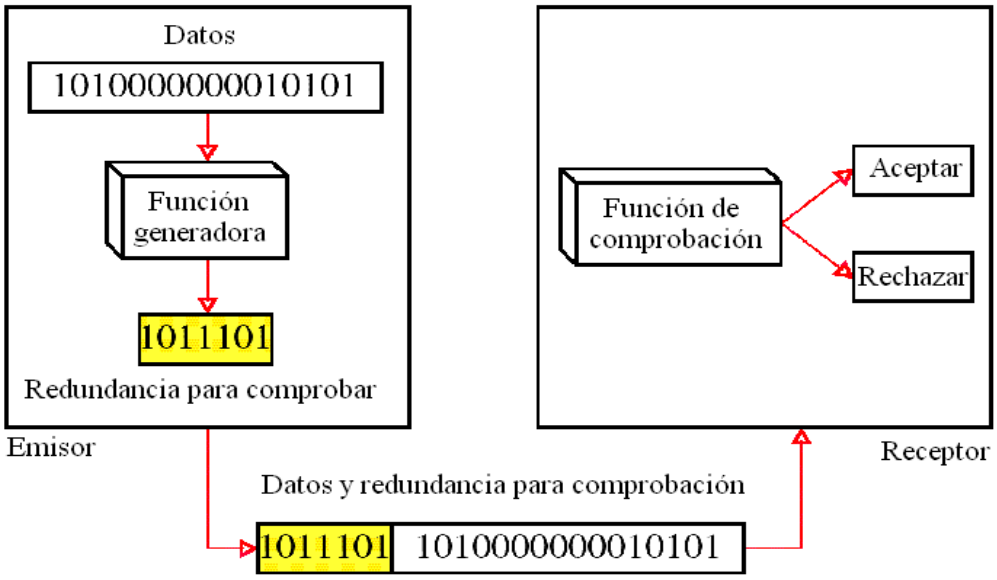


Figura 2.42.- *Bits de redundancia.*

En las comunicaciones de datos se usan cuatro tipos de comprobaciones de redundancia: verificación de redundancia vertical (VRC, *vertical redundancy check)* (también llamada verificación de paridad), verificación de redundancia longitudinal (LRC, *longitudinal redundancy check),* verificación de redundancia cíclica (CRC, *cyclic redundancy check)* y suma de comprobación *(checksum).* Las tres primeras, VRC, LRC y CRC se implementan habitualmente en el nivel físico para que se puedan usar en el enlace de datos. La cuarta, la suma de comprobación, se usa principalmente en los niveles más altos (véase la figura 2.43).

Figura 2.43.- Métodos de detección de errores.

Verificación de redundancia vertical (VRC).

El mecanismo de detección de errores más frecuente y más barato es la **verificación de redundancia vertical (VRC),** denominada a menudo **verificación de paridad.** En esta técnica, se añade un bit de redundancia, denominado **bit de paridad,** al final de cada unidad de datos de forma que el número total de unos en la unidad (incluyendo el bit de paridad) sea par.

Suponga que se quiere transmitir la unidad de datos binarios 1100001 [ASCII *a* (97)]; (vea la figura 2.44). Si se suma el número de unos se obtiene 3, un número impar. Antes de transmitir se pasa la unidad de datos a través de un generador de paridad. El generador de paridad cuenta los unos y añade el bit de paridad (un 1 en este caso) al final. El número total de unos es ahora 4, un número par. A continuación el sistema transmite la unidad expandida completa a través del enlace de red. Cuando alcanza el destino, el receptor pasa los 8 bits a través de una función de verificación de **paridad par.** Si el receptor ve 11100001, cuenta cuatro unos, un número par, y la unidad pasa la comprobación. Pero ¿qué ocurre si la unidad de datos ha sufrido daños en el transito ¿Qué ocurre si en lugar de recibir 11100001 el receptor ve 11100101? En ese caso, cuando el comprobador de paridad cuenta los unos obtiene cinco, un número impar. El receptor sabe que en alguna parte se ha producido un error en los datos y por tanto rechaza la unidad completa.

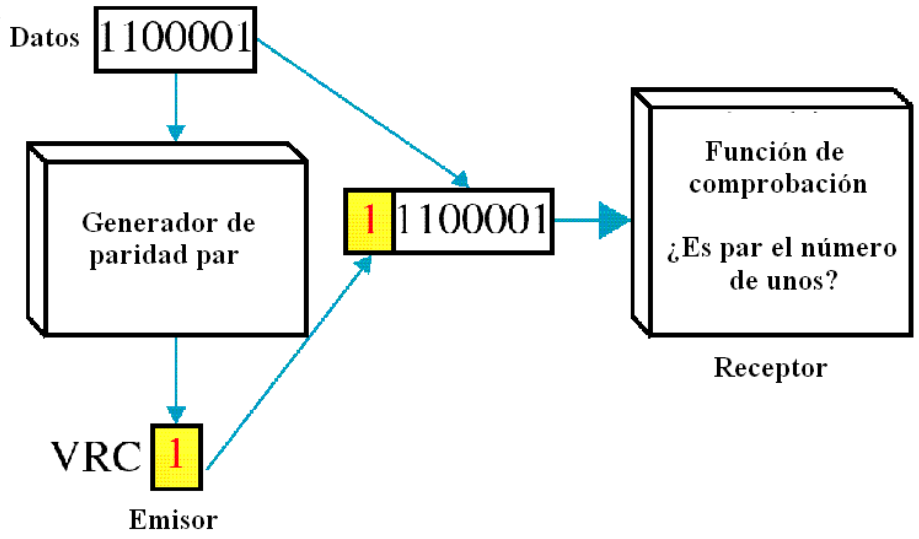


Figura 2.44.- *Concepto de VRC con paridad par.*

Observe que en, aras a la simplicidad, se está hablando únicamente de la verificación de paridad par, donde el número de unos debería ser un número par. Algunos sistemas podrían usar verificación de **paridad impar,** donde el número de unos debería ser impar. El principio es el mismo, pero el cálculo es distinto.

Ejemplo 1.-

Imagine que el emisor quiere enviar la palabra «world». En ASCII los cinco caracteres se codifican como

⇦	1110111	1101111	1110010	1101100	1100100
	w	**o**	**r**	**l**	**d**

Cada uno de los cuatro primeros caracteres tiene un número par de unos, por lo que su bit de paridad es 0. Sin embargo, el último carácter ('d') tiene tres unos (un número impar), por lo que su

bit de paridad es 1 para que el número total de unos sea par. A continuación se muestran los bits enviados realmente (los bits de paridad están subrayados).

⇦ 1110111<u>0</u> 1101111<u>0</u> 1110010<u>0</u> 1101100<u>0</u> 1100100<u>1</u>

Ejemplo 2.-
Suponga ahora que la palabra «world» del ejemplo anterior es recibida por el receptor sin que haya habido ningún problema de corrupción en la transmisión.

⇦ 1110111<u>0</u> 1101111<u>0</u> 1110010<u>0</u> 1101100<u>0</u> 1100100<u>1</u>

El receptor cuenta los unos en cada carácter y obtiene números pares (6, 6, 4, 4, 4). Por lo tanto, aceptaría los datos.

Ejemplo 3.-
Suponga ahora que la palabra «world» del Ejemplo 1, es recibida por el receptor pero que sus datos han sido corrompidos durante la transmisión.

⇦ 111***1***111<u>0</u> 1101111<u>0</u> 1110***1***10<u>0</u> 1101100<u>0</u> 1100100<u>1</u>

El receptor cuenta los unos en cada carácter y obtiene números pares e impares (7, 6, 5, 4, 4). El receptor sabe que los datos están corruptos, los descarta y solicita su retransmisión.

Prestaciones
VRC puede detectar todos los errores en un único bit. También puede detectar errores de ráfagas siempre que el total de números de bits cambiados sea impar (1, 3, 5, etc.). Supongamos que hay una unidad de datos con paridad par donde el número total de unos, incluyendo el bit de paridad, es 6:1000111011. Si tres bits cualesquiera cambian su valor, la paridad resultante sería impar y se detectaría el error: 1***111***111011 son 9, ***011***0111011 son 7, 1***1***00***0***1***0***011 son 5, todos impares. El comprobador de VRC devolvería como resultado 1 y se rechazaría la unidad. Esto mismo es cierto para cualquier número de errores impares.

Sin embargo, suponga que dos bits de la unidad de datos cambian su valor: 1***11***0111011 son 8, 1*1*00***0***11011 son 6, 1000***0***1101***0***: 4. En cada caso, el número de unos en la unidad de datos sigue siendo par. El comprobador de VRC los sumará y devolverá un número par, aunque la unidad de datos contiene dos errores. VRC no puede detectar errores cuando el número total de bits cambiados sea par. Si cambian dos bits cualesquiera durante la transmisión, los cambios se anulan entre sí y la unidad de datos pasará la verificación de paridad aunque sea erróneo. Esto mismo es cierto para cualquier número de errores pares.

Verificación de redundancia longitudinal (LRC)

En la **verificación de redundancia longitudinal (LRC),** los bloques de bits se organizan en forma de tabla (filas y columnas). Por ejemplo, en lugar de enviar un bloque de 32 bits, se organizan en una tabla de cuatro filas y ocho columnas, como se muestra en la figura 2.45.

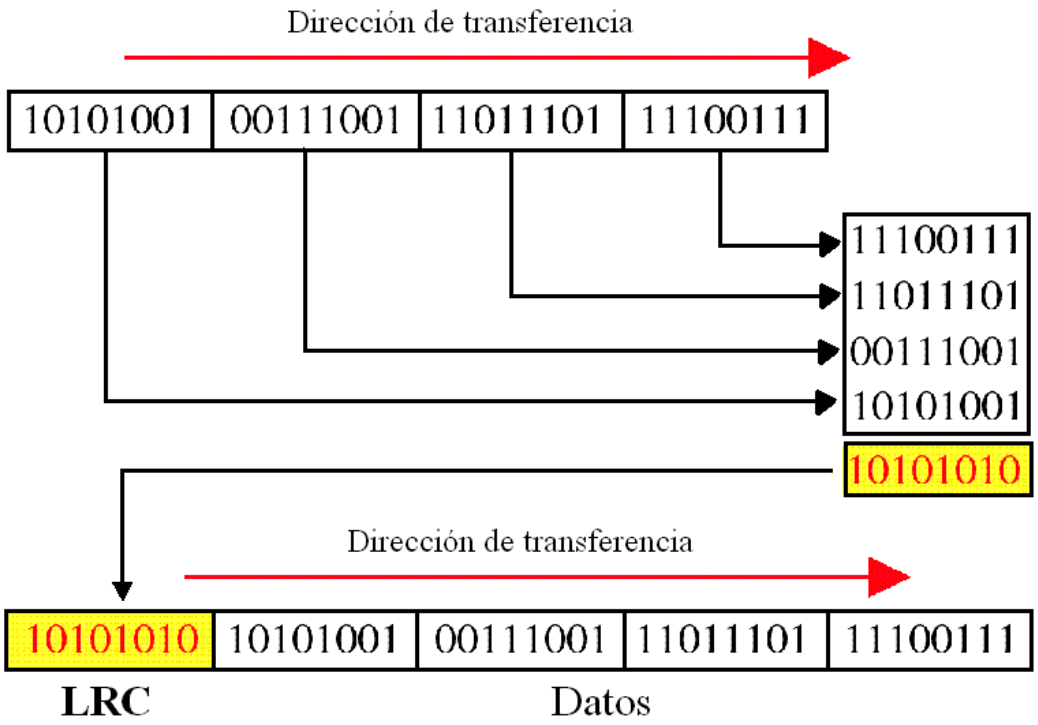


Figura 2.45.- Verificación de Redundancia Longitudinal (*LRC).*

A continuación se calcula un bit de paridad para cada columna y se crea una nueva fila de ocho bits, que son los bits de paridad de todo el bloque. Observe que el primer bit de paridad de la quinta fila se calcula basándose en todos los primeros bits. El segundo bit de paridad se calcula basándose en los segundos bits, etc. A continuación se añaden los ocho bits de paridad a los datos originales y se envían al receptor.

Ejemplo 1.-
Suponga que se envía el siguiente bloque:

⇦ 10101001 00111001 11011101 11100111 10101010
(LRC)

Sin embargo, hay una ráfaga de ruido de longitud ocho y algunos bits se corrompen (en itálica).

⇦ 1010***0011*** ***1000***1001 11011101 11100111 10101010

Cuando el receptor comprueba el LRC, algunos de los bits no siguen la regla de paridad par y se descarta todo el bloque (los bits de LRC que no coinciden se muestran en negrita).

⇦ 1010***001***1 ***1000***1001 11011101 11100111 **10101010**
(LRC recibido)
00010000
(LRC recalculado)

Prestaciones
La LRC incrementa la probabilidad de detectar errores de ráfaga. Como se ve en el ejemplo anterior, una LRC de *n* bits puede detectar fácilmente un error de ráfaga de *n* bits. Un error de

ráfaga de más de *n* bits tiene también grandes posibilidades de ser detectado por la LRC. Sin embargo, hay un patrón de errores que sigue sin ser detectado. Si se dañan dos bits de una unidad de datos y se dañan otros dos bits de otra unidad de datos que están exactamente en la misma posición, el comprobador de LRC no detectará un error. Por ejemplo, considere las dos unidades de datos siguientes: 11110000 y 11000011. Si cambian el primer y el último bit de cada uno de ellos, haciendo que las unidades de datos sean ***0***1110001 y ***0***1000001***0***, no se pueden detectar los errores usando LRC.

Verificación de redundancia cíclica (CRC)

La tercera y más potente técnica de verificación de redundancia es la **verificación de redundancia cíclica (CRC).** A diferencia de VRC y LRC, que se basan en la suma, la CRC se basa en la división binaria. Con la CRC, en lugar de sumar los bits juntos para conseguir una paridad determinada, se añade una secuencia de bits redundantes, denominados CRC o residuo CRC, al final de la unidad de datos de forma que los datos resultantes sean divisibles exactamente por un número binario predeterminado. En el destino, la unidad de datos que se recibe es dividida por este mismo número. Si en este paso no hay residuo, se asume que la unidad de datos es intacta y se acepta. La existencia de un residuo indica que la unidad de datos ha sufrido daños durante el tránsito y que debe ser rechazada.

Los bits de redundancia usados en la CRC se obtienen dividiendo la unidad de datos por un divisor determinado; el residuo es la CRC. Para que sea válida, una CRC debe tener dos cualidades: debe tener exactamente un bit menos que el divisor y añadirlo al final de la tira de datos debe hacer que el resultado sea exactamente divisible por el divisor.

Tanto la teoría como la aplicación de la detección de error con CRC son inmediatas. Su única complejidad es la obtención de la CRC. Comenzaremos con una introducción para clarificar este proceso e iremos añadiendo complejidad a medida que se avanza. La figura 2.46 muestra un esquema con los tres pasos básicos.

1.- En primer lugar, se añade una tira de ***n*** ceros a la unidad de datos. El número *n* es uno menos que el número de bits en el divisor predefinido, que tiene *n* + 1 bits.

2.- En segundo lugar, la nueva unidad de datos se divide por el divisor usando un proceso denominado división binaria. El residuo resultante de esta división es la CRC.

3.- En tercer lugar, la CRC de *n* bits obtenida en el paso 2 sustituye a los ceros añadidos al final de la unidad de datos. Observe que la CRC puede estar formada por ceros.

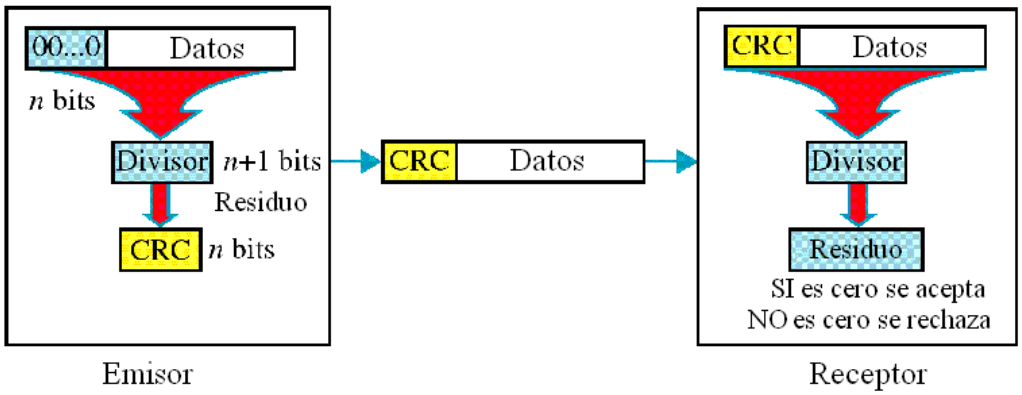


Figura 2.46.- *Generador y comprobador de CRC.*

La unidad de datos llega al receptor en primer lugar, seguida por la CRC. El receptor trata toda la tira como una unidad y la divide por el mismo divisor que se usó para hallar el residuo de la CRC. Si la tira llega sin error, el comprobador de CRC obtiene un residuo 0 y la unidad de datos se acepta. Si la tira ha cambiado durante la transmisión, la división "arroja un residuo no nulo y la unidad de datos no se acepta.

El generador de la CRC

Un generador de la CRC usa división módulo 2. La figura 2.47 muestra este proceso. En el primer paso, el divisor de cuatro bits se resta de los primeros cuatro bits del dividendo. Cada bit del divisor se resta del bit correspondiente del dividendo sin afectar al bit que hay a continuación. En el ejemplo, el divisor 1101 se resta de los cuatro primeros bits del dividendo, 1001, arrojando 100 (el 0 inicial del residuo se descarta).

A continuación se arrastra el siguiente bit sin usar del dividendo para hacer que el número de bits del residuo sea igual al número de bits del divisor. Por tanto, el paso siguiente es 1000 - 1101, lo que arroja 101, continuando el proceso de esta misma forma.

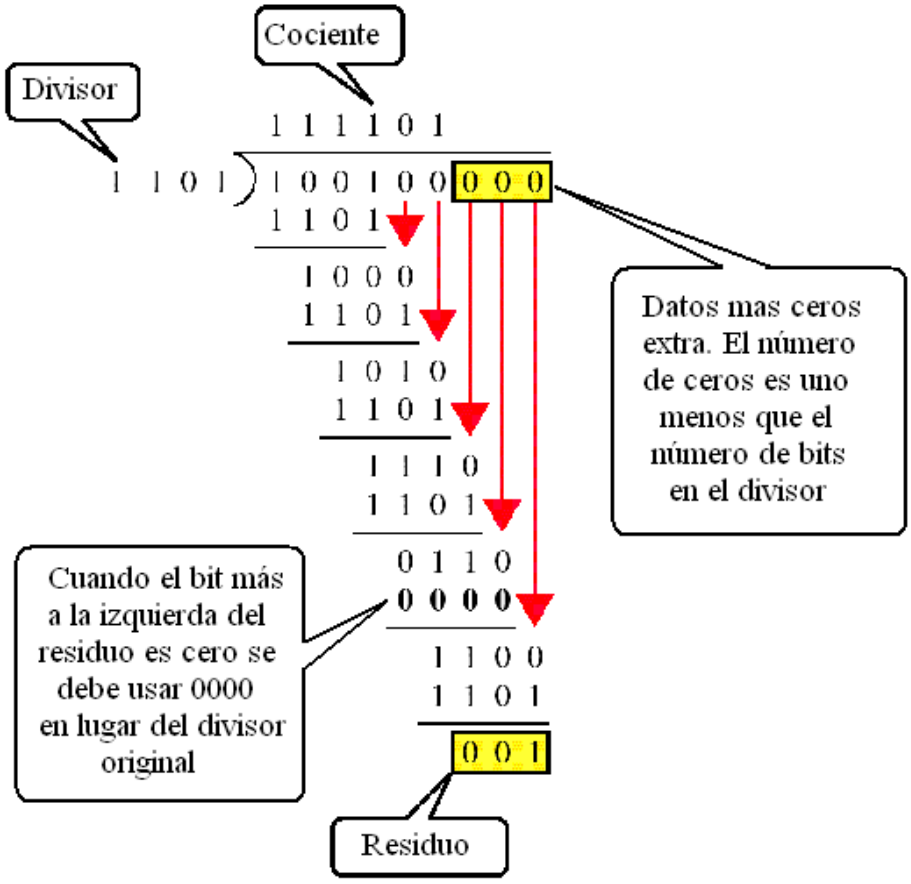


Figura 2.47.- *División binaria en un generador de CRC.*

En este proceso, el divisor siempre comienza con 1; el divisor se resta de una porción de la división dividendo/residuo anterior que sea igual en longitud; el divisor solamente se puede restar de las divisiones dividendo/residuo cuyo bit más a la izquierda es 1. Siempre que el bit más a la izquierda de la división dividendo/residuo es 0, una tira de ceros de la misma longitud que el divisor reemplaza al divisor en ese paso del proceso. Por ejemplo, si el divisor tiene cuatro bits, se sustituye por cuatro ceros. (Recuerde que estamos trabajando con patrones de bits, no con

valores cuantitativos; 0000 no es lo mismo que 0.) Esta restricción significa que, en cualquier paso, la resta más a la izquierda será 0 - 0 ó 1 - 1, ambas igual a 0. Por tanto, después de la resta, el bit más a la izquierda del residuo será siempre 0, por lo que se descarta, y se arrastra el siguiente bit sin usar del dividendo para completar el residuo. Observe que únicamente se descarta el primer bit del residuo: si el segundo bit es también 0, se mantiene, y el siguiente paso de la división dividendo/residuo comenzará con un 0. Este proceso se repite hasta que se ha utilizado todo el dividendo.

El comprobador de CRC

Un comprobador de CRC funciona igual que el generador. Después de recibir los datos y la CRC, hace la siguiente división módulo 2. Si todo el residuo son ceros, la CRC se descarta y se aceptan los datos; en cualquier otro caso, el flujo de bits recibido se descarta y se retransmiten los datos. La figura 2.48 muestra el proceso de división en el receptor. Se asume que no hay error. Por tanto, todo el residuo son ceros y se aceptan los datos.

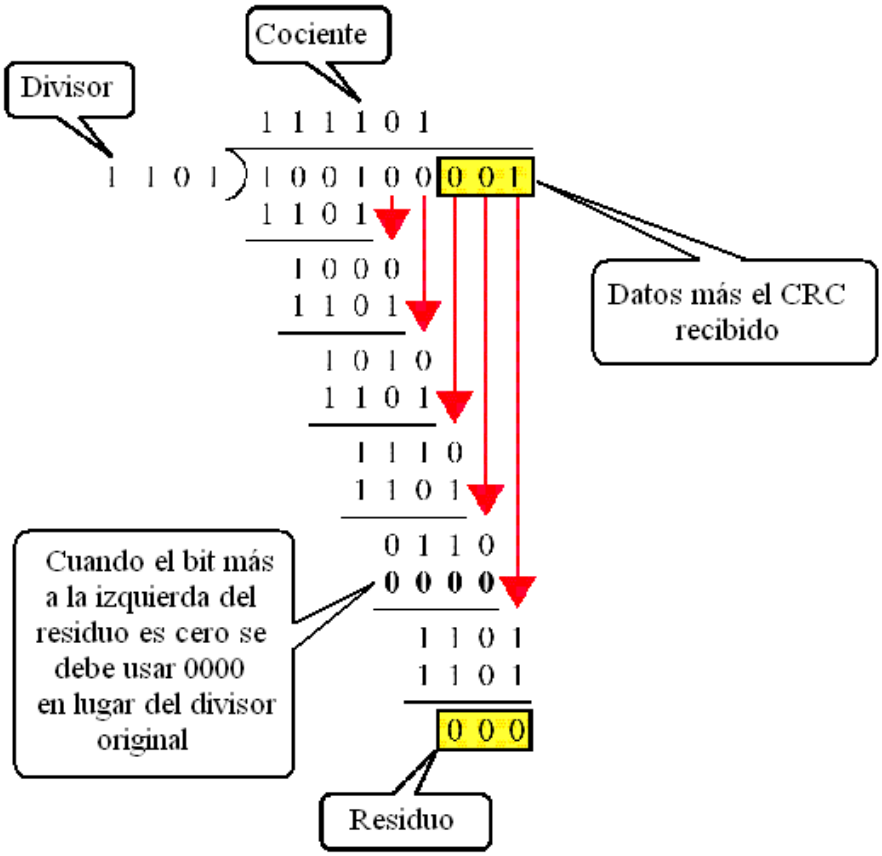


Figura 2.48.- *División binaria en el comprobador de CRC.*

Polinomios

El generador de la CRC (el divisor) no se suele representar a menudo como una tira de unos y ceros, sino como un polinomio algebraico (véase la figura 2.49). El formato polinomial es útil por dos razones: es corto y se puede usar para demostrar conceptos matemáticamente (lo que está fuera del ámbito de este curso).

$$x^7 + x^5 + x^2 + x + 1$$

Figura 2.49.- *Un polinomio algebraico.*

La relación de un polinomio con su correspondiente representación binaria se muestra en la figura 2.50.

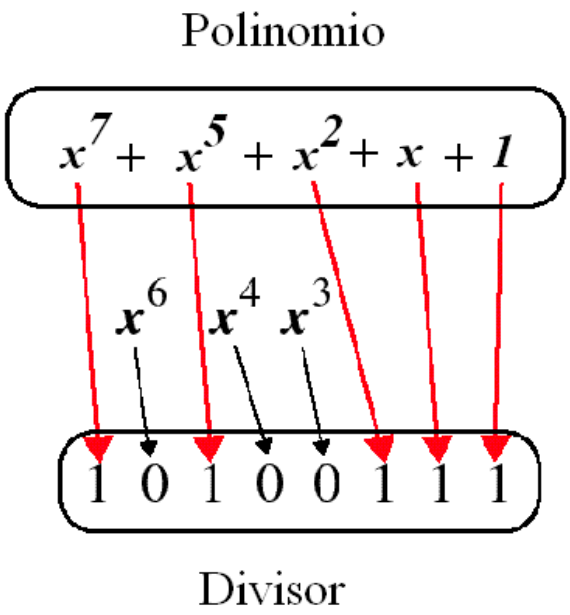


Figura 2.50.- *Un polinomio que representa un divisor.*

Se debería seleccionar un polinomio que tenga al menos las siguientes propiedades:

• No debería ser divisible por *x*.
• Debería ser divisible por (*x* + 1).

La primera condición garantiza que se pueden detectar todos los errores de ráfaga de una longitud igual al grado del polinomio. La segunda condición garantiza que se detectan todos los errores de ráfaga que afectan a un número impar de bits (la demostración está fuera del ámbito de este curso).

Ejemplo 1.-
Es obvio que no se puede elegir x (binario 10) o x2 + x (binario 110) como polinomio porque ambos son divisibles por x. Sin embargo, se puede elegir x +1 (binario 11) porque no es divisible por x, pero es divisible por x + 1. También se puede elegir x2 +1 (binario 101) porque es divisible por x + 1 (división binaria).

En la figura 2.51 se muestran los polinomios estándares usados por los protocolos más populares para la generación de CRC. Los números 12, 16 y 32 se refieren al tamaño del residuo CRC. Los divisores CRC son 13, 17 y 33 bits respectivamente.

CRC-12	CRC-16	CRC-ITU
$x^{12}+x^{11}+x^{3}+x+1$	$x^{16}+x^{15}+x^{2}+1$	$x^{16}+x^{12}+x^{5}+1$

CRC-32

$$x^{32}+x^{26}+x^{23}+x^{22}+x^{16}+x^{12}+x^{11}+x^{10}+x^{8}+x^{7}+x^{5}+x^{4}+x^{2}+x+1$$

Figura 2.51.- *Polinomios normalizados.*

Prestaciones.
CRC es un método de detección de errores muy efectivo. Si se elige el divisor de acuerdo a las reglas mencionadas anteriormente,

1.- CRC puede detectar todos los errores de ráfaga que afectan a un número impar de bits.
2.- CRC puede detectar todos los errores de ráfaga de longitud menor que o igual que el grado del polinomio.
3.- CRC puede detectar con probabilidad muy alta errores de ráfaga con longitud mayor que el grado del polinomio.

Ejemplo 2.-
El CRC-12 ($x^{12} + x^{11} + x^{3} + x + 1$), que tiene un grado de 12, detectará todos los errores de ráfaga que afectan a un número impar de bits, todos los errores de ráfaga con una longitud menor o igual que 12 y detectará el 99.97 % de errores de ráfaga con longitud mayor o igual a 12.

Corrección de errores:

Se han desarrollado dos estrategias principales para manejar los errores. Una es incluir suficiente información redundante en cada bloque de datos transmitido para que el receptor pueda deducir lo que debió ser el carácter transmitido. La otra estrategia es incluir sólo suficiente redundancia para permitir que el receptor sepa que ha ocurrido un error (pero no qué error) y entonces solicite una retransmisión. La primera estrategia utiliza códigos de corrección de errores; la segunda usa códigos de detección de errores. El uso de códigos de corrección de errores usualmente se conoce como corrección de errores hacia adelante.

Cada una de estas técnicas ocupa un nicho ecológico diferente. En los canales que son altamente confiables, como los de fibra, es más económico utilizar un código de detección de errores y simplemente retransmitir los bloques defectuosos que surgen ocasionalmente. Sin embargo, en los canales que causan muchos errores, como los enlaces inalámbricos, es mejor agregar la redundancia suficiente a cada bloque para que el receptor pueda descubrir cuál era el bloque original transmitido, en lugar de confiar en una retransmisión, que también podría tener errores.

En teoría, es posible corregir cualquier error automáticamente en un código binario. Sin embargo, los códigos correctores de errores son más sofisticados que los códigos detectores de errores y necesitan más bits de redundancia. El número de bits necesarios para corregir un error de varios

bits o un error de ráfaga es tan alto que en la mayoría de los casos su uso no resulta eficiente. Por esta razón, la mayoría de la corrección se limita a errores de uno, dos o tres bits.
Para entender la manera en que pueden manejarse los errores, es necesario estudiar de cerca lo que es en realidad un error. Por lo general, una trama consiste en *m* bits de datos (es decir, de mensaje) y *r* bits redundantes o de verificación. Sea la longitud total *n* (es decir, $n = m + r$). A una unidad de *n* bits que contienen datos y bits de verificación se le conoce como palabra codificada (codeword) de *n* bits.

Dadas dos palabras codificadas cualesquiera, digamos 10001001 y 10110001, es posible determinar cuántos bits correspondientes difieren. En este caso, difieren tres bits. Para determinar la cantidad de bits diferentes, basta aplicar un OR exclusivo a las dos palabras codificadas y contar la cantidad de bits 1 en el resultado, por ejemplo:

$$\begin{array}{c} 10001001 \\ \underline{10110001} \\ 00111000 \end{array}$$

La cantidad de posiciones de bits en la que difieren dos palabras codificadas se llama distancia de Hamming. Su significado es que, si dos palabras codificadas están separadas una distancia de Hamming *d,* se requerirán *d* errores de un bit para convertir una en la otra.

En la mayoría de las aplicaciones de transmisión de datos, todos los 2^m mensajes de datos posibles son legales, pero debido a la manera en que se calculan los bits de verificación no se usan todas las 2^n palabras codificadas posibles. Dado el algoritmo de cálculo de los bits de verificación, es posible construir una lista completa de palabras codificadas legales y encontrar, en esta lista, las dos palabras codificadas cuya distancia de Hamming es mínima. Ésta es la distancia de Hamming de todo el código.

Las propiedades de detección y corrección de errores de un código dependen de su distancia de Hamming. Para detectar *d* errores se necesita un código con distancia $d + 1$, pues con tal código no hay manera de que *d* errores de un bit puedan cambiar una palabra codificada válida a otra Cuando el receptor ve una palabra codificada no válida, sabe que ha ocurrido un error de transmisión. De manera similar, para corregir *d* errores se necesita un código de distancia $2d + 1$, pues así las palabras codificadas legales están tan separadas que, aun con *d* cambios, la palabra codificada original sigue estando más cercana que cualquier otra palabra codificada, por lo que puede determinarse de manera única.

Como ejemplo sencillo de código de detección de errores, considere un código en el que se agrega un solo bit de paridad a los datos. Este bit se escoge de manera que la cantidad de bits 1 en la palabra código sea par (o impar). Por ejemplo, cuando se envía 1011010 con paridad par, se agrega un bit al final, y se vuelve 10110100. Con paridad impar, 1011010 se vuelve 10110101. Un código con un solo bit de paridad tiene una distancia de 2, pues cualquier error de un bit produce una palabra codificada con la paridad equivocada. Este sistema puede usarse para detectar errores individuales.

Ejemplo 1.-
Como ejemplo sencillo de código de corrección de errores, considere un código con sólo cuatro palabras codificadas válidas:

0000000000, 0000011111, 1111100000 y 1111111111

Este código tiene una distancia de 5, lo que significa que puede corregir errores dobles. Si llega la palabra codificada 0000000111, el receptor sabe que el original debió ser 0000011111. Sin embargo, si un error triple cambia 0000000000 a 0000000111, el error no se corregirá de manera adecuada.

Bits de redundancia

Imagine que deseamos diseñar un código con m bits de mensaje y r bits de verificación que permitirá la corrección de todos los errores individuales. Cada uno de los 2^m mensajes legales tiene n palabras codificadas ilegales a una distancia 1 de él. Éstas se forman invirtiendo en forma sistemática cada uno de los n bits de la palabra codificada de n bits que la forman. Por lo tanto, cada uno de los 2^m mensajes legales requiere n + 1 patrones de bits dedicados a él. Dado que la cantidad de patrones de bits es 2^n, debemos tener $(n + 1)\ 2^m < 2^n$. Usando n = m + r, este requisito se vuelve $(m + r + 1) < 2^r$. Dado m, esto impone un límite inferior a la cantidad de bits de verificación necesarios para corregir errores individuales.

Visto desde otra forma, para calcular el número de bits de redundancia (*r*) necesarios para corregir un número de bits determinado (*m*), es necesario encontrar una relación entre *m* y *r*. La figura 2.52 muestra *m* bits de datos con *r* bits de redundancia añadidos.

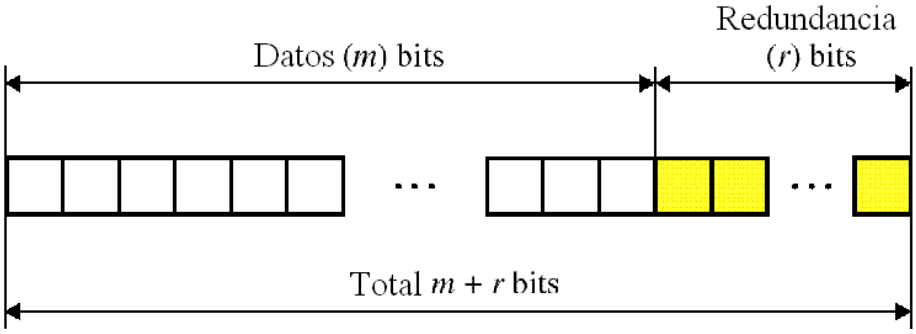


Figura 2.52.- *Bits de datos y de redundancia.*

La longitud del código resultante es m+r. Si el número total de bits en una unidad transmisible es m+r, entonces r debe ser capaz de indicar al menos m+r+1 estados distintos. De todos ellos, un estado significa que no hay error y m+r estados indican la existencia de un error en cualquiera de las m+r posiciones. Por tanto, es necesario descubrir m+r+1 estados con r bits; y r bits pueden indicar 2^r estados distintos. Por tanto, 2^r debe ser igual o mayor que m+r+1:

$$2^r \geq m+r+1$$

El valor de *r* se puede determinar despejando el valor de *m* (la longitud original de la unidad de datos a transmitir). Por ejemplo, si el valor de *m* es 7 (como en el código ASCII de siete bits), el valor más pequeño de *r* que puede satisfacer esta ecuación es 4:

$$2^4 \geq 7 + 4 + 1$$

La tabla siguiente muestra algunos valores posibles de m y sus correspondientes valores r.

Relación entre bits de datos y de redundancia

Número de bits de datos (m)	*Número de bits de redundancia (r)*	*Bits totales (m+r)*
1	2	3
2	3	5
3	3	6
4	3	7
5	4	9
6	4	10
7	4	11

Código Hamming

Este código sirve además de detectar errores los corrige. La forma que lo realiza es incrementar un dato de n bits, a K bits de paridad, después se enumeran los bits del 1 a n+K, empezando por la izquierda, los bits que resulten con numeración potencia de 2, se identifican como bits de paridad. Donde los bits de paridad que existan siempre serán 1.

Ejemplo 2.-: Si tenemos un dato 10011101 con 8 bits (2^3) tendrá 4 bits de paridad (K=4). Y se acomodan de la siguiente manera:

Se enumeran en sentido inverso →

1	0	0	1	1	1	0	1	+	1	1	1	**1**	=	**1**	**1**	1	**1**	0	0	1	**1**	1	1	0	1
Dato de 8 bits (n=8)									K=4 bits paridad					**1**	**2**	3	**4**	5	6	7	**8**	9	10	11	12
									2^3	2^2	2^1	2^0		No. Posición de los Bits de paridad											
														(2^0=**1**, 2^1=**2**, 2^2=**4** y 2^3=**8**)											

Los bits de datos se acomodan en los lugares que no son de paridad y la paridad de cada bit, será comprobada por los bits tales que: $b_1 + b_2 + \ldots\ldots + b_m = b_c$, de manera que cada bit de paridad compruebe la paridad de un grupo de bits. Donde: b_c = bit checado, b_m= bit de paridad de grupo, b_1 y b_2 = otros bits de paridad. Es decir:

Si n = 4 (2^2) entonces K = 3
Si n = 8 (2^3) entonces K = 4
Si n = 16 (2^4) entonces K = 5
Si n = 32 (2^5) entonces K = 6

Nota:

Cada bit es checado por el bit # cuya suma sea igual al de checar. Para detectar el error, se van checando uno a uno de la fila sin error a la de error y al final de las 2 filas con error se escoge el común posible error.

Es decir, en el ejemplo 2:

El bit 1 de paridad comprueba a los bits: 1, 3 (1+2), 5 (1+4), 7 (1+2+4), 9 (1+8), 11(1+2+8)
El bit 2 de paridad comprueba a los bits: 2, 3 (2+1), 6 (2+4), 7 (2+1+4), 10 (2+8), 11(2+1+8)
El bit 4 de paridad comprueba a los bits: 4, 5 (4+1), 6 (4+2), 7 (4+1+2), 12 (4+8)
El bit 8 de paridad comprueba a los bits: 8, 9 (8+1), 10 (8+2), 11 (8+1+2), 12 (8+4)

Ejemplo 3.-:
Verificar en código Hamming si existe un error en B7 con respecto al siguiente número binario: 111001110111.

Solución:

Sabemos que,	B	7
	1011	0111

Acomodando los bits quedaría de la siguiente manera:

1	0	1	1	0	1	1	1	+	1	1	1	1	=	**1**	**1**	1	**1**	0	1	1	**1**	0	1	1	1

Comparando los datos obtenidos tenemos:

Número binario original: 1 1 1 0 0 1 1 1 0 1 1 1.
Número binario obtenido:1 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1

Concluimos que si existe un error y está en el bit de la posición 4. Para corregirlo basta cambiar el bit en cuestión de 1 a 0.

Ejemplo 4.-: (para los alumnos)
Verificar en código Hamming si existe un error en A3 con respecto al siguiente número binario: 111101010011.

Otra manera de verificar y corregir los bits de una palabra por el código Hamming es la siguiente:

Ejemplo 5.-
Para un dígito recibido 1100010, calcúlese si se tiene un error simple y en tal caso, corríjase el error.

Solución: Posición del bit:	P_1	P_2	3	P_4	5	6	7
N =	1	1	0	0	0	1	0

Donde: P_1, P_2 y P_4 son los bits de paridad.

Se hacen las siguientes combinaciones:

P_1 + 3 (1+2) + 5 (1+4) + 7 (1+2+4) = 1 + 0 + 0 + 0 = **F** (falla en verificación de paridad par)
P_2 + 3 (2+1) + 6 (2+4) + 7 (2+1+4) = 1 + 0 + 1 + 0 = **E** (Paridad par, son dos 1s)
P_4 + 5 (4+1) + 6 (4+2) + 7 (4+1+2) = 1 + 0 + 0 + 0 = **F** (falla en verificación de paridad par)

Recordando:
Falla = **F**ault (paridad, impar = odd)
Par = **E**ven (paridad par)

Ahora por medio de la siguiente tabla:

P_4	P_2	P_1	Posición del bit con falla
E	E	E	Ninguno
E	E	F	1
E	F	E	2
E	F	F	3
F	E	E	4
F	**E**	**F**	**5**
F	F	E	6
F	F	F	7

Notas:

- E es como si fuera un 0 y F como si fuera un 1.
- Esta tabla solo se utiliza hasta números de 7 bits.

Concluimos refiriéndonos a la tabla anterior, observamos que el error existe en el bit # 5, es decir:

Posición del bit:	1	2	3	4	**5**	6	7
Dato original recibió:	1	1	0	0	0	1	0
Corrigiendo el error:	1	1	0	0	1	1	0

2.4.- Control de flujo:

Con la transmisión únicamente se puede poner la señal en la línea, pero no hay forma de controlar cuál de los dispositivos conectados a la línea lo recibirá, no hay forma de saber si el receptor supuesto está listo y es capaz de recibir y no hay forma de evitar que un segundo dispositivo transmita al mismo tiempo y destruya por tanto nuestra señal.

La comunicación necesita al menos dos dispositivos trabajando juntos, uno para enviar y otro para recibir. Este acuerdo tan sencillo necesita mucha coordinación para que se dé un intercambio de información inteligible. La coordinación de la transmisión es parte de un procedimiento denominado **disciplina de línea**. Además de la disciplina de línea, las funciones más importantes de nivel de enlace son el control de flujo y el control de errores. Estas funciones son los que se conocen como control del nivel de enlace (ver la figura 2.54).

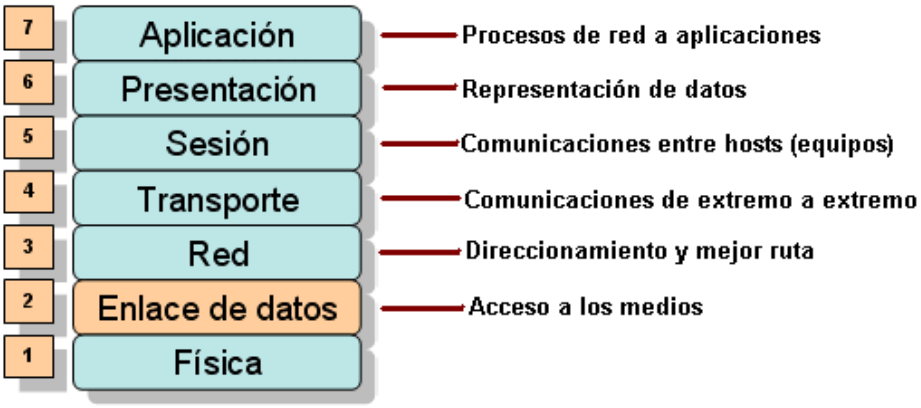


Figura 2.53.- *Nivel de enlace de datos.*

- La disciplina de línea coordina el sistema de enlaces. Determina que dispositivo puede enviar y cuando puede hacerlo.
- El control de flujo coordina la cantidad de datos que se puede enviar antes de recibir un reconocimiento. También proporciona al receptor un reconocimiento de las tramas recibidas intactas y, por tanto, está relacionado con el control de errores.
- El control de errores significa detección y corrección de errores. Permite al receptor informar al emisor de las tramas perdidas o dañadas durante la transmisión y coordina la retransmisión de estas tramas por el emisor (ver la figura 2.54).

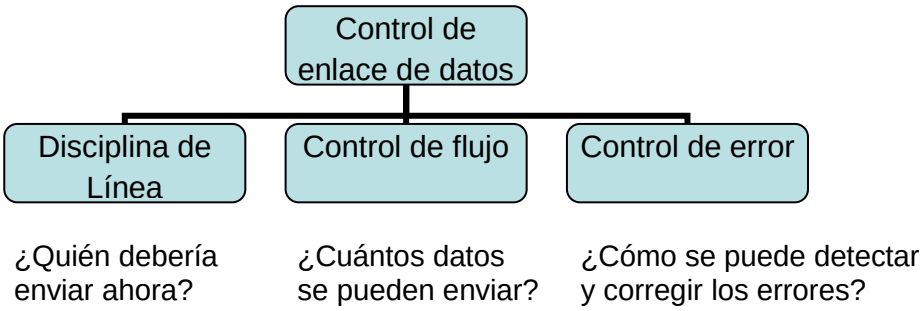


Figura 2.54.- *Control del nivel de enlace de datos.*

Control de Flujo.-

En la mayoría de los protocolos, el control de flujo es un conjunto de procedimientos que le dice al emisor cuantos datos puede transmitir antes de esperar un reconocimiento del receptor. No se debe permitir que el flujo de datos desborde al receptor. Cualquier dispositivo de recepción tiene una velocidad limitada para procesar los datos que recibe y una cantidad limitada de memoria en la que almacenar dichos datos. El dispositivo receptor debe ser capaz de informar al dispositivo emisor antes de que estos límites se alcancen y de pedir al dispositivo transmisor que envíe menos tramas o que pare temporalmente. Los datos recibidos deben ser procesados y comprobados antes de poderse usar. La velocidad de este procedimiento suele ser más lenta que la velocidad de transmisión. Por esta razón, cada dispositivo receptor tiene un bloque de memoria denominado **buffer**, reservado para almacenar los datos recibidos hasta que pueda procesarlos. Si el buffer comienza a llenarse, el receptor debe ser capaz de decirle al emisor que pare la transmisión hasta que vuelva a ser capaz de recibir.
Se ha desarrollado dos métodos para controlar el flujo de datos a través de enlaces de líneas de comunicación: Parada y espera y ventana deslizante (vea la figura 2.55).

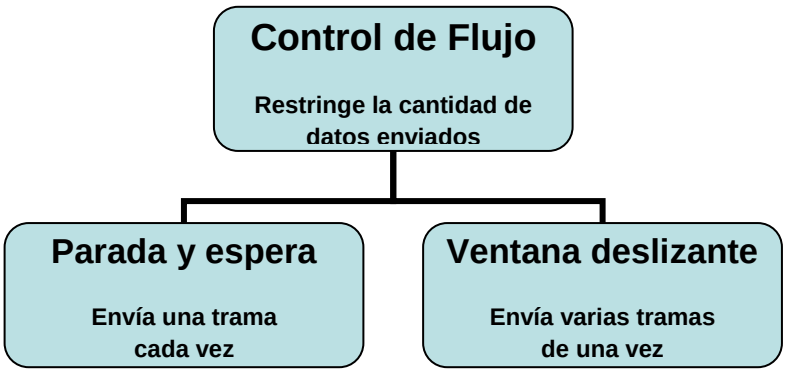


Figura 2.55.- *Clases de control de flujo.*

Parada y espera:

En el método de control de flujo con **parada y espera** (*stop and wait*), el emisor (TX = Transmisor) espera un reconocimiento (ACK = *acknowledgement*) después de cada trama que envía (vea la figura 2.56). Solamente se envía la siguiente trama cuando se ha recibido un reconocimiento. Este proceso de enviar y recibir alternativamente se repite hasta que el emisor envía una trama de fin de transmisión (EOT). La parada y espera se puede comparar con un ejecutivo meticuloso dictando algo: dice una palabra, su asistencia dice "OK", dice otra palabra, su asistente dice "OK" y así hasta el final.

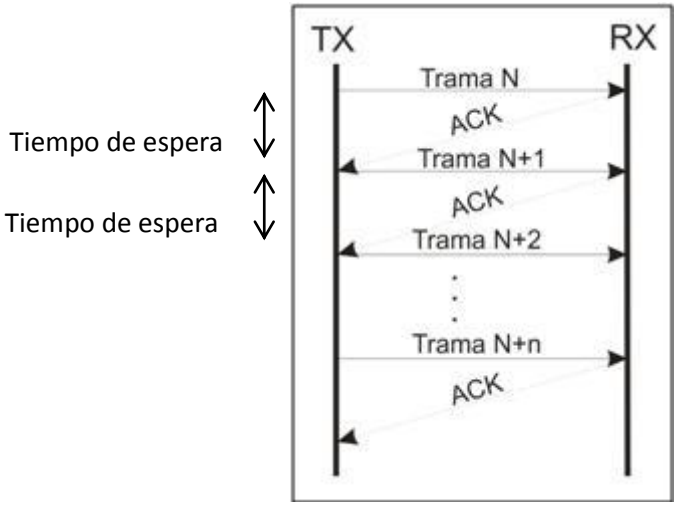


Figura 2.56.- *Método de Parada y Espera.*

La ventaja de la parada y espera es su sencillez: cada trama es comprobada y reconocida antes que se envíe la siguiente. La desventaja es su ineficiencia: la parada y espera es muy lenta. Cada Trama debe recorrer el camino hasta el receptor y un reconocimiento debe viajar del receptor al emisor antes de poder enviar éste la trama siguiente. En otras palabras, cada trama está sola en la línea. Cada trama enviada y recibida usa todo el tiempo necesario para atravesar el enlace. Si la distancia entre los dispositivos es larga, el tiempo que se gasta esperando ACK entre cada trama puede ser una parte importante del tiempo total de transmisión.

Ventana deslizante:

En el método de control de flujo con **ventana deslizante**, el emisor puede transmitir varias tramas antes de necesitar un reconocimiento. Las tramas se pueden enviar una detrás de otra, lo que significa que el enlace puede transportar varias tramas de una vez y que su capacidad se puede usar de forma más eficiente.

El receptor notifica el reconocimiento únicamente para algunas de las tramas, usando un único ACK para confirmar la recepción de múltiples tramas de datos.

La ventana deslizante usa unas cajas imaginarias en el emisor y el receptor. Esta ventana puede mantener tramas (paquetes) en cualquiera de los dos extremos y proporciona un límite superior

en el número de tramas que se pueden transmitir antes de recibir un reconocimiento. Las tramas pueden ser reconocidas en cualquier momento sin esperar hasta que la ventana se llene y pueda ser transmitida mientras que la ventana no éste todavía llena. En la figura 2.57 se ilustra un ejemplo de éste método.

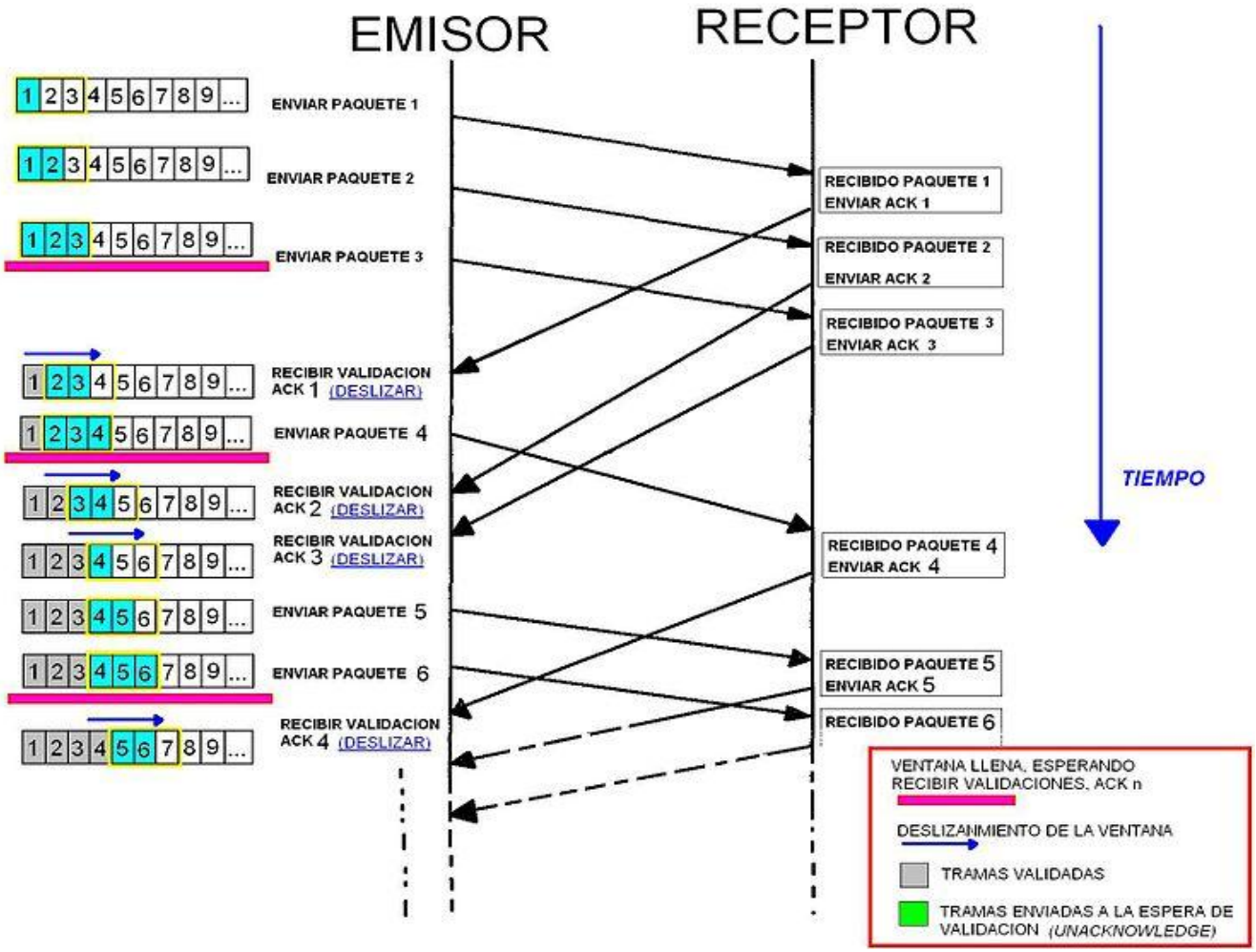


Figura 2.57.- *Método de Ventana Deslizante.*

Ventana del emisor.- Al principio de la transmisión, la ventana del emisor contiene n-1 tramas. A medida que se envían las tramas, el límite izquierdo de la ventana se mueve hacia dentro, reduciendo el tamaño de la misma.

Conceptualmente, la ventana deslizante del emisor se encoge desde la izquierda cuando las tramas de datos se envían. La ventana deslizante del emisor se expande a la derecha cuando se reciben los reconocimientos.

Ventana del receptor.- Al principio de la transmisión, la ventana del receptor no contiene n-1 tramas sino n-1 espacios para tramas. A medida que llegan nuevas tramas, el tamaño de la ventana del receptor se encoge. Por tanto, la ventana del receptor no representa el número de tramas recibidas sino el número de tramas que todavía se pueden recibir antes de enviar un ACK.

Conceptualmente, la ventana deslizante del receptor se encoge desde la izquierda cuando se reciben tramas de datos. La ventana deslizante del receptor se expande a la derecha cuando se envían los reconocimientos.