



 Alfaomega Grupo Editor

Comunicaciones

Castro-Fusario

Capítulo 3:

Técnicas de la transmisión de la
información



Temas:

- **3.1 Introducción**
- **3.2 Elementos sobre transmisión de la información**
- **3.3 Medidas de la velocidad en la transmisión de información**
- **3.4 Características de un enlace de datos**
- **3.5 Canales de comunicaciones**
- **3.6 Capacidad de un canal**
- **3.7 Concepto de velocidad máxima de transmisión**
- **3.8 Ruido**
- **3.9 Distorsión**
- **3.10 Errores en el proceso de transmisión de datos**
- **3.11 Corrección de errores**



3.1 Introducción

- Se analizarán arquitectura y topología de los sistemas de transmisión de datos.
- Se analizarán los principales parámetros empleados en informática, como Byte, bloque, palabra, velocidades de transmisión y modulación.
- Se estudiarán los canales utilizados en la transmisión de datos, ideales y reales.
- Se verá en los canales reales el efecto que producen el ruido, la atenuación y la distorsión, para generar errores.
- Sobre la base de los estudios de Nyquist, Shannon y Hartley, se mostrará cómo se llega a determinar la capacidad de un canal de comunicaciones, con ruido y sin él.
- Ante la presencia de los errores en los canales reales, se analizarán los principales métodos de detección y corrección más utilizados.
- Se incluye una introducción a la teoría de la información, la cual nos permite hallar la tasa de información de las fuentes y relacionarla con la capacidad de los canales de comunicaciones.



3.2 Elementos sobre transmisión de la información

3.2.1 Introducción a las redes de telecomunicaciones

Red de telecomunicaciones: conjunto de medios técnicos instalados, operados, organizados y administrados con la finalidad de facilitar a los usuarios los distintos servicios de comunicaciones disponibles.

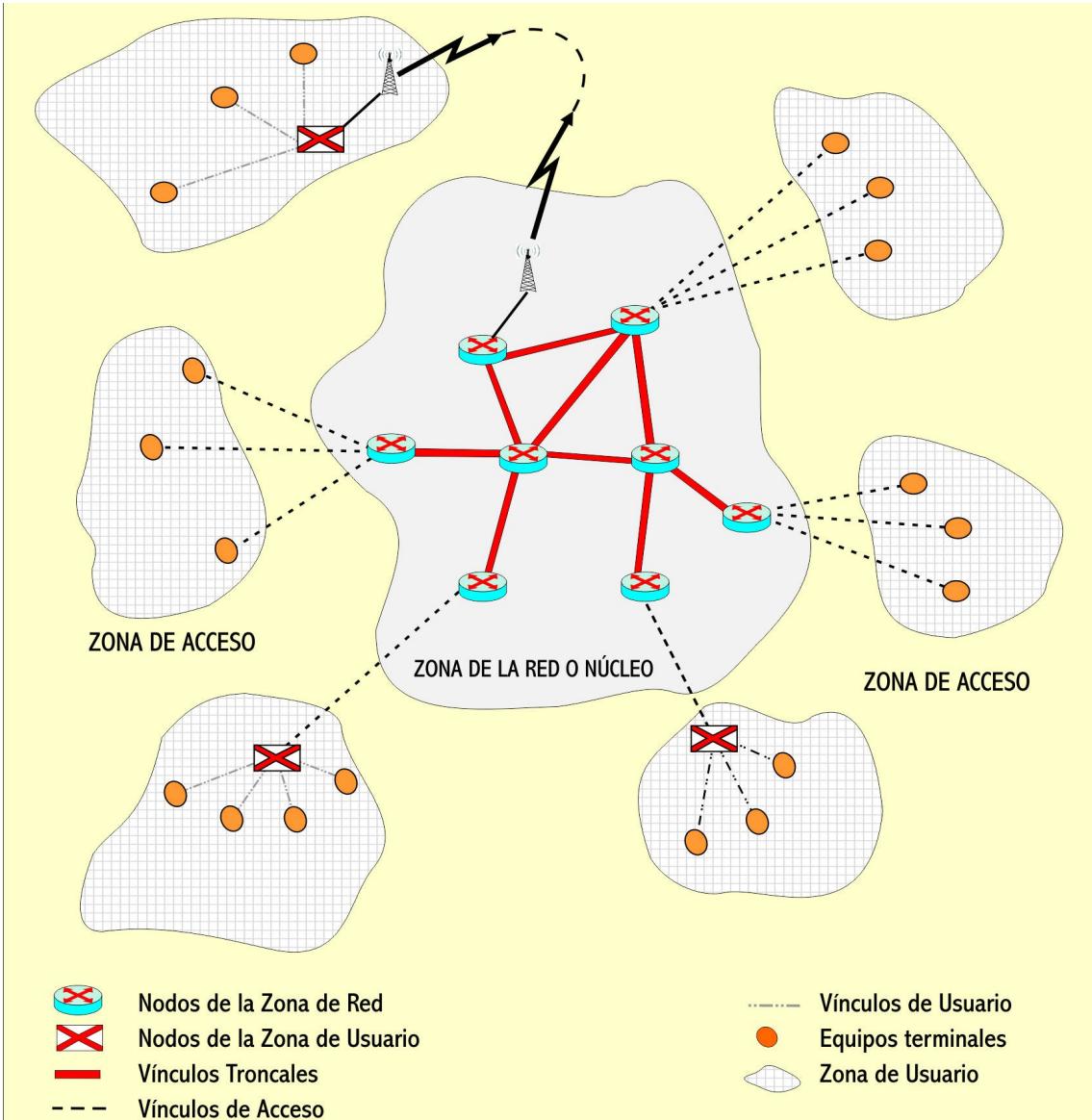
- brindan velocidades adecuadas a la demanda, confiabilidad, tecnologías elaboradas y calidad de servicio.
- deben tener una cobertura global
- deben integrar las comunicaciones móviles y fijas.



3.2.2 Estructura general de una red de telecomunicaciones

La arquitectura de una red está compuesta por tres zonas:

- Zona de la red o núcleo.
- Zona de acceso.
- Zona del usuario.





En las distintas zonas las redes de telecomunicaciones están constituidas por los siguientes elementos:

Nodos

- Conmutación
- Concentración

Equipos terminales

- Telefónicos
- Datos
- Video
- Otros

Enlaces de comunicaciones

- Troncales
- De acceso
- Locales



3.2.3 Definiciones utilizadas en comunicaciones

Nodos: cumplen funciones de conmutación o concentración de los vínculos.

Vínculos: son los distintos medios físicos que permiten unir dos nodos de una red.

Los vínculos se pueden establecer por:

-medios físicos (cables de cobre, coaxiles, fibras ópticas, cables submarinos, etc.)

-medios inalámbricos (sistemas de microondas, satelitales, radioeléctricos, etc.)

Enlace: el vínculo entre dos equipos terminales para intercambiar señales inteligentes utilizando servicios disponibles.



3.2.4 Teleinformática

3.2.4.1 Definición y concepto de teleinformática

Teleinformática=telecomunicaciones + informática= telemática

Estas técnicas se desarrollaron en forma independiente.

En la actualidad su interdependencia es cada vez mayor.

Teleinformática es la especialidad que estudia el conjunto de técnicas necesarias para transmitir datos entre puntos situados en lugares remotos, a través de redes de telecomunicaciones.



3.2.4.2 Sistemas teleinformáticos

Son los sistemas funcionales de comunicación de datos.

Responden a necesidades concretas de los usuarios informáticos que trabajan en la modalidad fuera de planta o remota.

Modalidades:

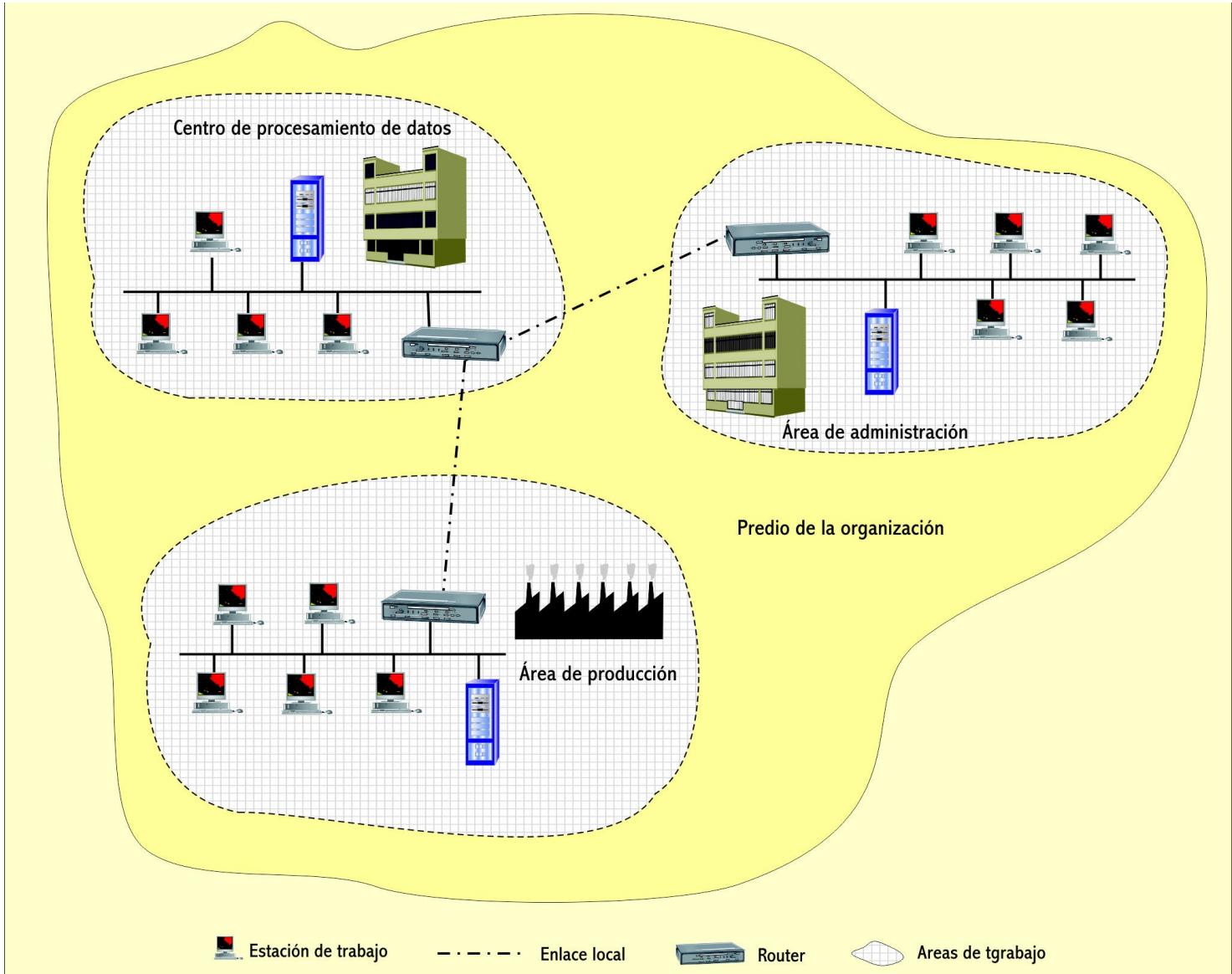
- Gestión remota de archivos
- Sistemas teleinformáticos interactivos
- Sistemas teleinformáticos de control de procesos

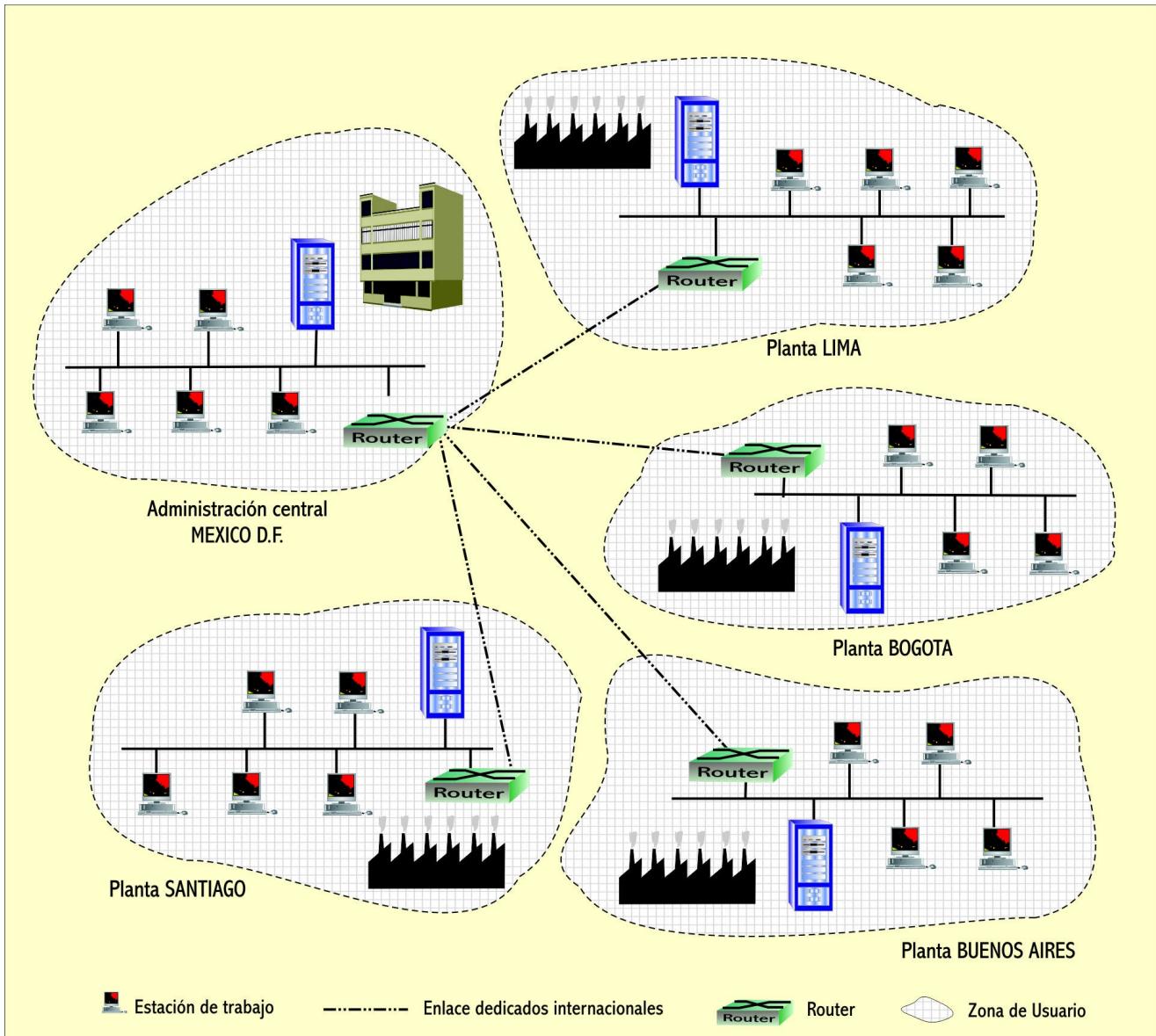


3.2.5 Conceptos utilizados en transmisión de datos

3.2.5.1 Definición y concepto de transmisión de datos

Recomendación X.15 de la UIT-T: define la transmisión de datos como la acción de enviar datos a través de un medio de telecomunicaciones, desde el lugar de origen a otro de recepción.







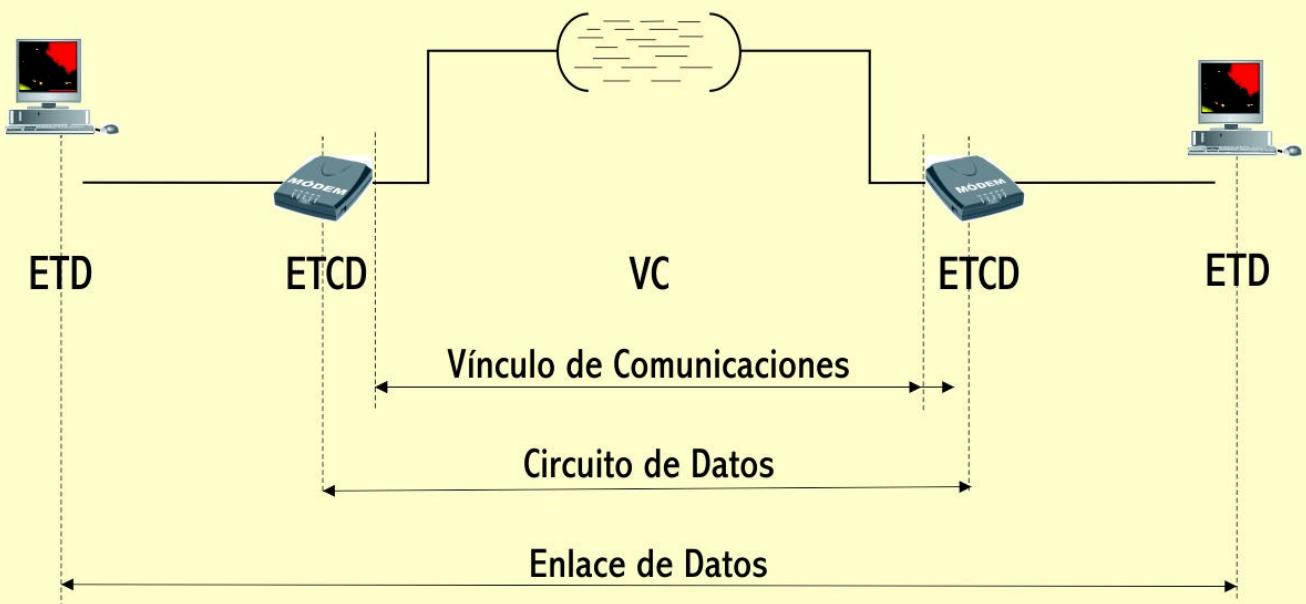
3.2.5.2 Definición y concepto de enlace y circuito de datos

La finalidad de establecer un enlace de datos es permitir la intercomunicación de:

- un equipo terminal de datos (ETD), denominado fuente
- con otro equipo, denominado colector
- a través de un enlace de comunicaciones, que puede ser parcial o totalmente analógico o digital.



Esquema de un enlace de datos.



ETD - Equipo Terminal de Datos

ETCD - Equipo Terminal de Circuito de Datos

VC - Vínculo de Comunicaciones

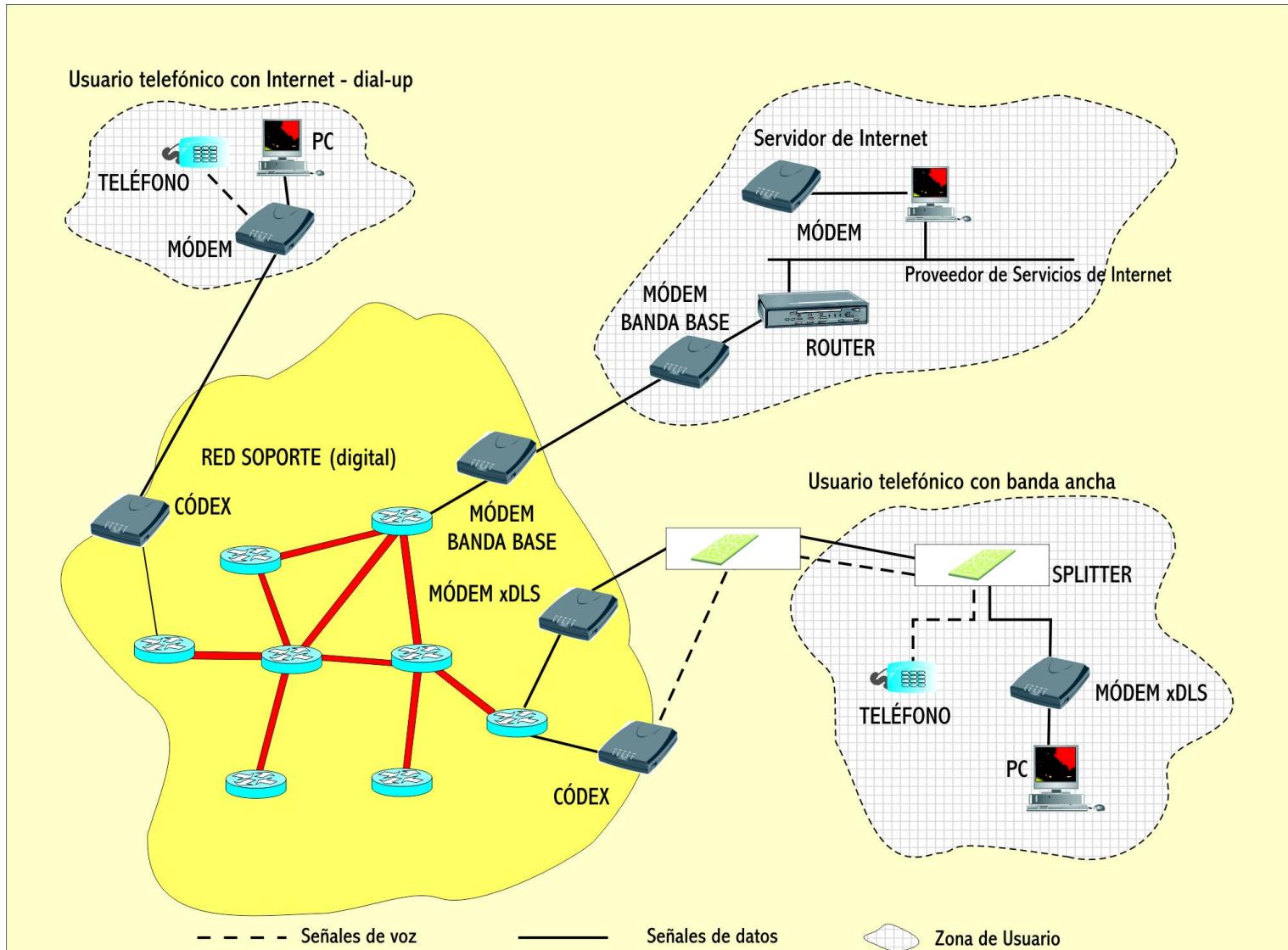


La UIT-T define al enlace de datos como:

- el conjunto formado por la red de interconexión y distintas instalaciones terminales
- que funciona según un modo específico
- permite el intercambio de información entre instalaciones terminales.

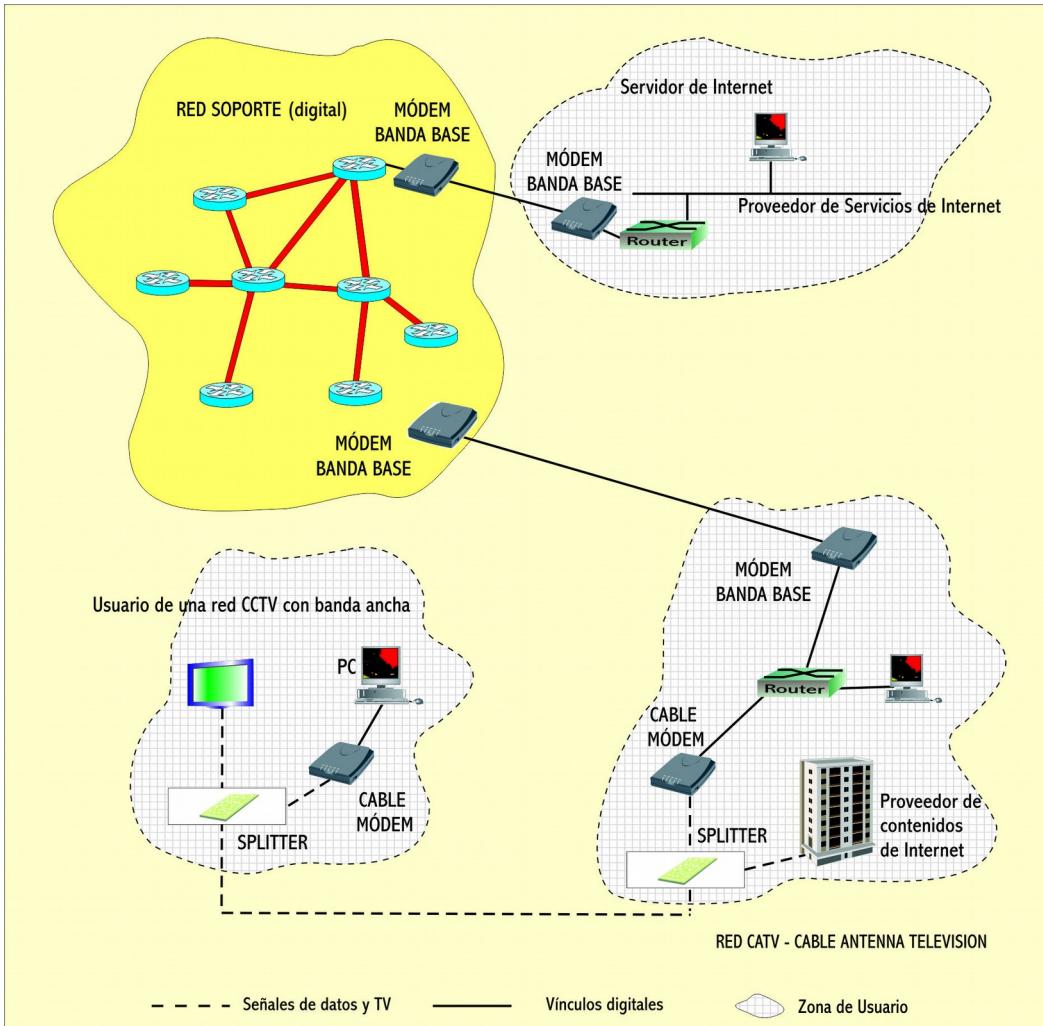
En un circuito teleinformático el enlace de datos está formado por:

- Equipos terminales de datos (ETD).
- Equipos terminales del circuito de datos (ETCD).
- Vínculo de comunicaciones (VC).



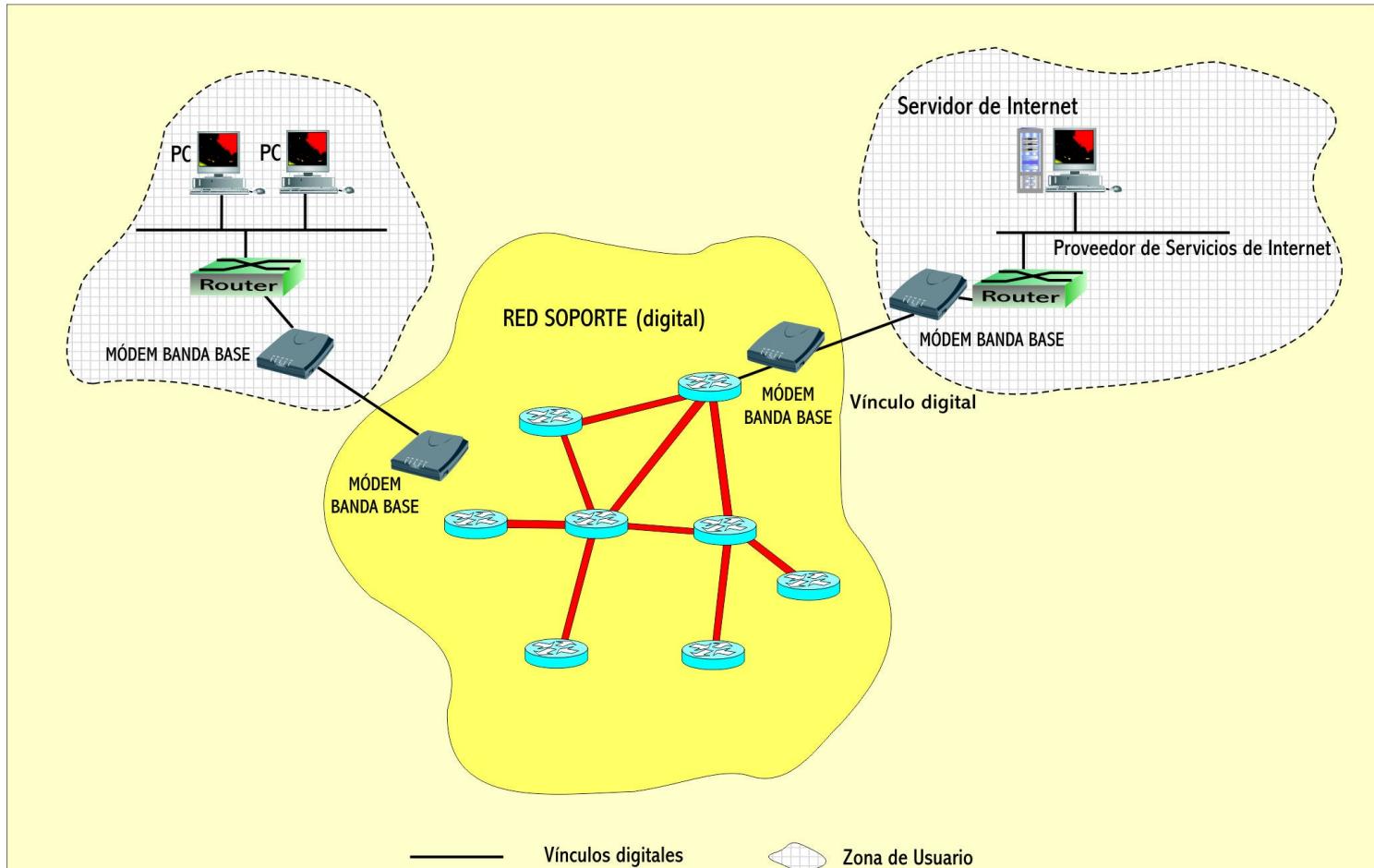


Distribución de Internet por cable



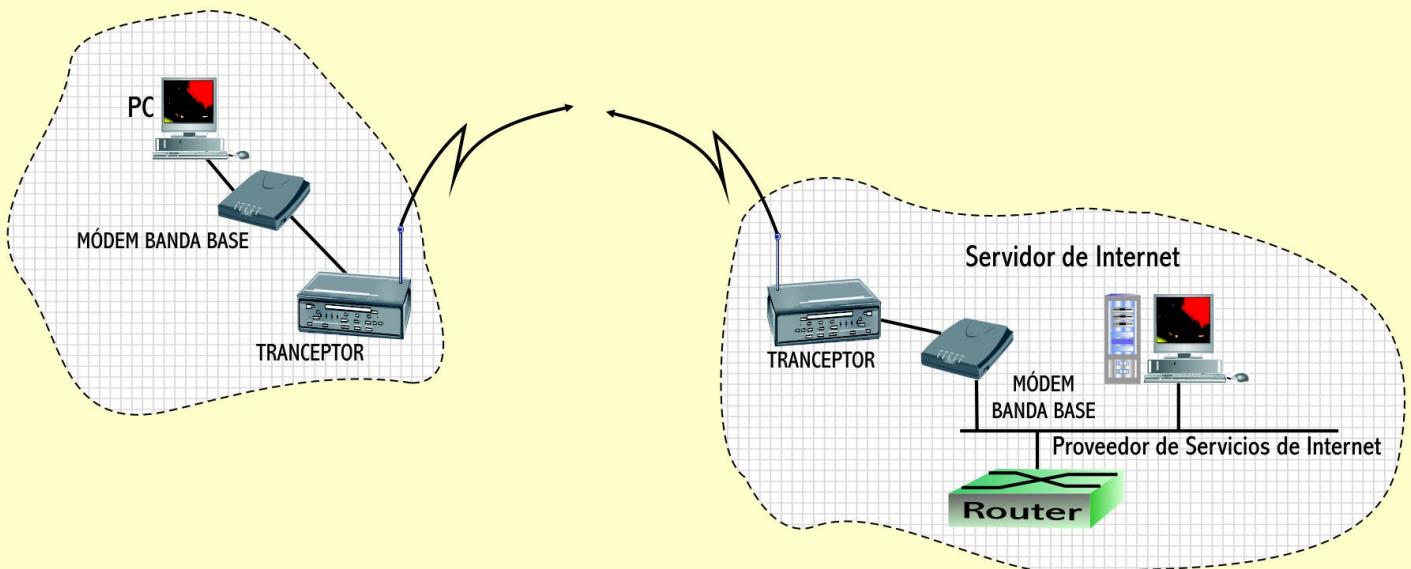


Círcito de datos a través de un vínculo dedicado digital





Círculo de datos a través de un vínculo inalámbrico



— Vínculos digitales



Zona de Usuario



3.2.6 Definiciones utilizadas en Informática

3.2.6.1 Definición de byte

Muchos sistemas de codificación utilizan 8 bits para codificar un carácter, el concepto inicial que se tiene sobre el byte es que siempre se necesita un conjunto de ocho bits para configurarlo.

Byte: número de bits utilizados para representar un carácter en un sistema de codificación dado.



3.2.6.2 Definición de palabra

Palabra: número de caracteres (bytes) fijos que una computadora trata como una unidad cuando los transfiere entre sus distintas unidades o los somete a diversos procesos, como lectura, escritura en memoria, operaciones aritméticas, etc.



3.2.6.3 Concepto de bloque

Bloque:

- conjunto de bits que recibe un tratamiento único a los efectos de la transferencia de datos entre la memoria y los equipos periféricos.
- conjunto de bits que a los efectos de la protección y la corrección de errores, se considera una sola unidad.



3.3 Medidas de la velocidad en la transmisión de información

3.3.1 Definiciones

3.3.1.1 *Velocidad de modulación*

Es la inversa de la medida del intervalo de tiempo nominal más corto entre dos instantes significativos sucesivos de la señal modulada.



Es la inversa del tiempo que dura el elemento más corto de señal, que se utiliza para crear un byte.

$$V_m = \frac{1}{T}$$

Donde

T = duración del ancho del pulso (más corto).

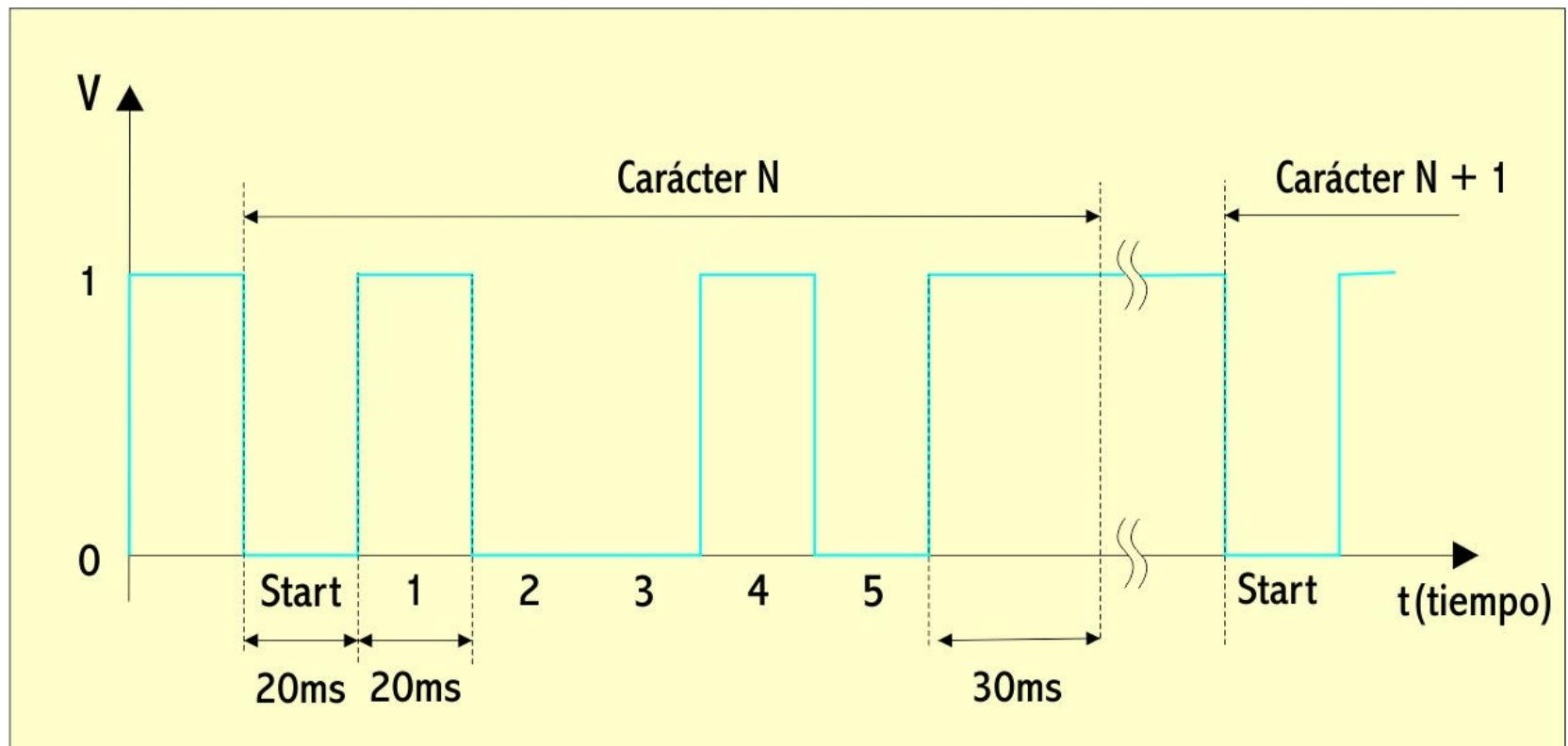
En unidades resultará:

$$[V_m] = \frac{1}{[seg]} = [\text{Baudio}]$$

Esta velocidad se relaciona con la línea de transmisión.



Transmisión de un carácter a través del servicio Télex.





3.3.1.2 Velocidad binaria o velocidad de transmisión, o de información

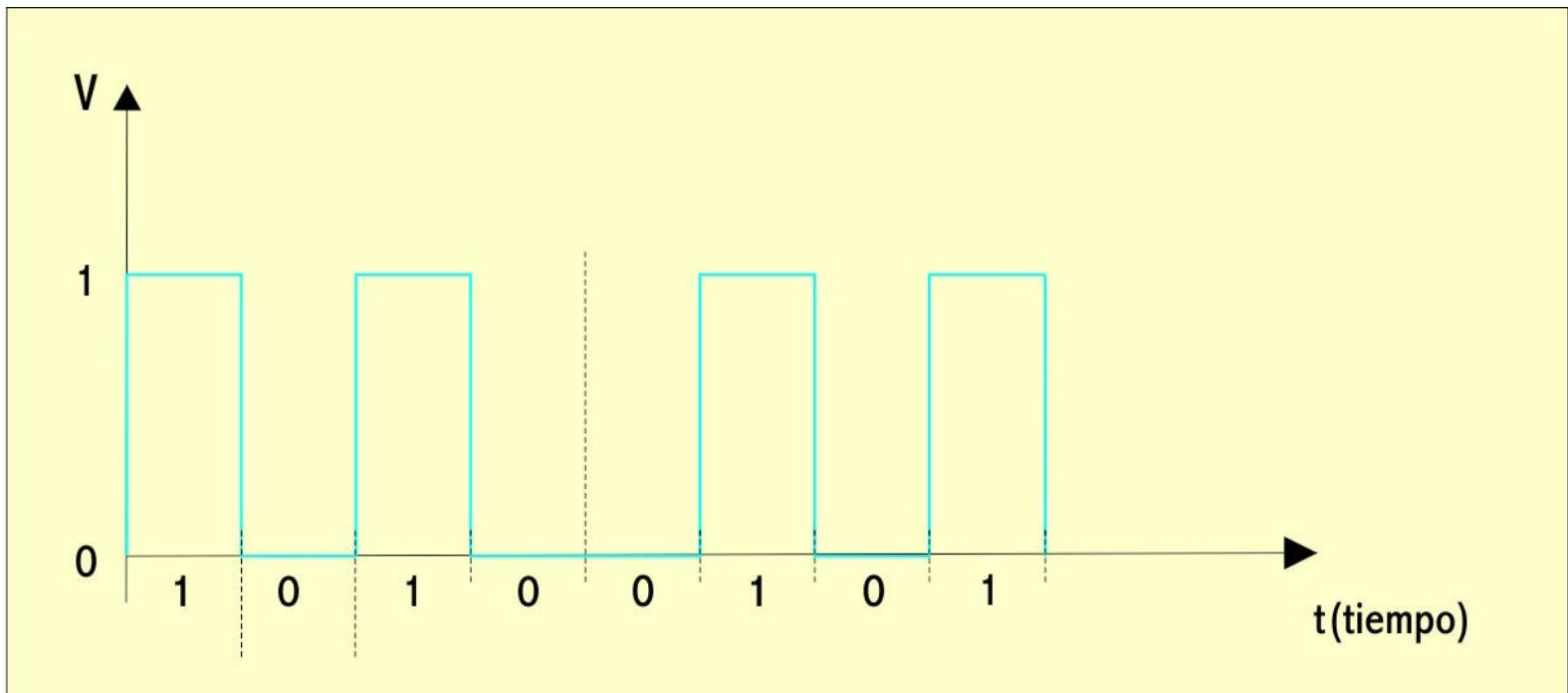
Recomendación R.140 de la UIT-T: la velocidad binaria es la velocidad global de transmisión expresada en bits por segundo. Es el número de dígitos binarios transmitidos en la unidad de tiempo, independientemente de que estos lleven información o no.

$$V_t = \frac{1}{T} \log n$$

$$[V_t] = [bps]$$



Forma de una señal binaria de período igual a 5 mseg.





3.3.1.3 Velocidad de transmisión en señales multinivel

Cuando las señales son multinivel cada pulso transmitido puede contener más de un bit de información.

Aumenta la velocidad de información sin incrementar la velocidad de modulación.

En teoría la cantidad de niveles (n) puede tener cualquier valor, pero en la práctica debe responder a la fórmula siguiente:

$$n = 2^M$$



3.3.1.4 Velocidad de transferencia de datos

Es el número medio de bits por unidad de tiempo que se transmiten entre equipos correspondientes a un sistema de transmisión de datos.

$$V_{td} = \frac{\text{número de bits transmitidos}}{\text{tiempo empleado}}$$

La V_{td} se mide en *bps* (bits por segundo).

Si en lugar de bits se consideran bytes, caracteres, palabras o bloques, u otra forma de medir la información, y en lugar de medir el tiempo en segundos se emplearan minutos u horas, se tendrían valores del tipo:

$$V_{td} = \frac{\text{byte}}{\text{segr}} \text{ o } V_{td} = \frac{\text{bloque}}{\text{hora}} .$$



3.3.1.5 Definición de tasa de errores

Un canal de comunicaciones puede agregar errores de transmisión.

La transmisión puede efectuarse por medios analógicos o digitales, pero la tasa de errores está referida siempre a la recepción en forma digital de los datos en el sumidero.

La tasa de errores se suele expresar mediante la sigla BER.

A medida que un circuito teleinformático tiene mayor confiabilidad, menor será el valor de la tasa de errores.

Tasa de errores sobre un equipo terminal de datos, que actúa como sumidero, es la relación entre los bits recibidos de manera errónea respecto de la cantidad total de bits transmitidos.

$$BER = \frac{\text{Cantidad de bits con errores}}{\text{Cantidad de bits transmitidos}}$$



3.3.1.6 Velocidad real de transferencia de datos

Interesa saber la cantidad de bits por unidad de tiempo que saliendo de la fuente llegan al colector, y además, este los acepta como válidos.

Velocidad real de transmisión de datos (o velocidad efectiva) es el número medio de bits por unidad de tiempo que se transmiten entre los equipos de un sistema de transmisión de datos, a condición de que el sumidero o receptor los acepte como válidos.

$$V_{rd} = \frac{\text{número de bits transmitidos y aceptados como válidos}}{\text{tiempo empleado}}$$



3.3.1.7 Eficiencia o rendimiento de un sistema de transmisión de datos

El administrador de un sistema informático que trabaja en forma remota necesitará calcular el tiempo real que tardarán en realizarse determinadas operaciones.

El tiempo a emplear se podría despejar de la ecuación:

$$\text{Tiempo a emplear [seg]} = \text{Long.del archivo [bit]} / V_{rtd} [\text{bps}]$$



Para el cálculo de la velocidad de transmisión se consideran todos los bits transmitidos, tengan información o no.

Para el cálculo de la velocidad de transferencia de datos solo se tienen en cuenta los bits de información transmitidos.

Entonces:

$$V_t \gg V_s$$

Para transformar esta desigualdad en una igualdad, se deberá agregar al segundo miembro un factor $\alpha > 1$, tal que:

$$V_t = \alpha V_s$$



En la velocidad de transferencia de datos se consideran todos los bits de información transmitidos, incluidos los que contienen errores.

En la velocidad real de transferencia de datos solo se toman en cuenta los bits transmitidos aceptados como válidos, cuya cantidad sin duda será menor.

$$V_{\text{tr}} \gg V_{\text{rd}}$$

Podremos transformar esta desigualdad en igualdad mediante un factor $\beta \geq 1$, donde $\beta = 1$, si la transmisión fuera libre de errores.

Para todos los casos:

$$V_{\text{tr}} = \beta V_{\text{rd}}$$



3.3.1.7 Eficiencia o rendimiento de un sistema de transmisión de datos

Reemplazando V_{td} por el valor obtenido:

$$V_t = \alpha \beta V_{rd}$$

Si hacemos $\alpha \beta = \gamma$:

Eficiencia o rendimiento ε de un enlace de datos es el cociente entre la velocidad real de transferencia de datos y la velocidad de transmisión:

Entonces ε es la inversa de γ :

$$\varepsilon = \frac{V_{rd}}{V_t}$$

Si $\frac{V_{rd}}{V_t} = \frac{1}{\gamma}$ entonces

$$\frac{V_{rd}}{V_t} = \frac{1}{\gamma}$$

$$\varepsilon = \frac{1}{\gamma}$$



Para conocer el valor de la velocidad real se pueden hacer distintas pruebas a varias horas del día, con archivos de longitud conocida, midiendo el tiempo que se demora en su transmisión.

$$V_{\text{real}} = \frac{\text{Longitud de un archivo conocido}}{\text{Tiempo empleado en recibido}}$$

Conocido este valor se podrá obtener la eficiencia del enlace utilizado.



3.4 Características de un enlace de datos

3.4.1 Utilización del ancho de banda

Un canal de comunicaciones:

- define técnicamente el tipo de señales que va a transportar (analógicas o digitales)
- define el hardware de comunicaciones (amplificadores en los canales analógicos, y repetidores regenerativos en los canales digitales)



El tiempo de transmisión debe ser mínimo para que:

- El procesamiento de la información sea más eficiente (debe llegar la mayor cantidad de datos por unidad de tiempo).
- La respuesta llegue en el menor tiempo posible para no demorar la actividad del operador cuando se opera en tiempo real.
- Tener menor costo (si se cobra en función de la duración, cuanto menor sea el tiempo de transmisión, menor será su costo).



3.4.2 Relación entre ancho de banda y velocidad de modulación. Transmisión multinivel

Cuanto mayor es la velocidad de modulación menor es el ancho del pulso T transmitido de cada uno de ellos.

Este tiempo se relaciona con:

- la energía almacenada en el sistema eléctrico que posibilita la transmisión, y
- la resistencia que esta opone al cambio de la polaridad que se produce en cada pulso transmitido.



Cuando la velocidad de modulación es mayor que el ancho de banda disponible, el canal reacciona aumentando la tasa de errores.

Para cada canal de comunicaciones existe una relación entre tres parámetros que están relacionados:

- Ancho de banda.
- Tasa de errores.
- Velocidad de modulación.



3.4.3 La medida del ancho de banda en canales digitales

En los canales analógicos el ancho de banda se expresa en *Hertz*.

En los canales digitales el ancho de banda se expresa en *bit/seg*.

Expresiones para un canal analógico y otro digital:

$$[\Delta f] = \frac{1}{[\text{seg}]} = \text{Hertz}$$

$$[\Delta f] = \frac{[\text{bit}]}{[\text{seg}]} = \text{bps}$$

Como el bit es adimensional:

$$[\Delta f] = \frac{1}{[\text{seg}]} = \frac{[\text{bit}]}{[\text{seg}]}$$



Un canal está transmitiendo una trama compuesta por una cantidad Q de bits.

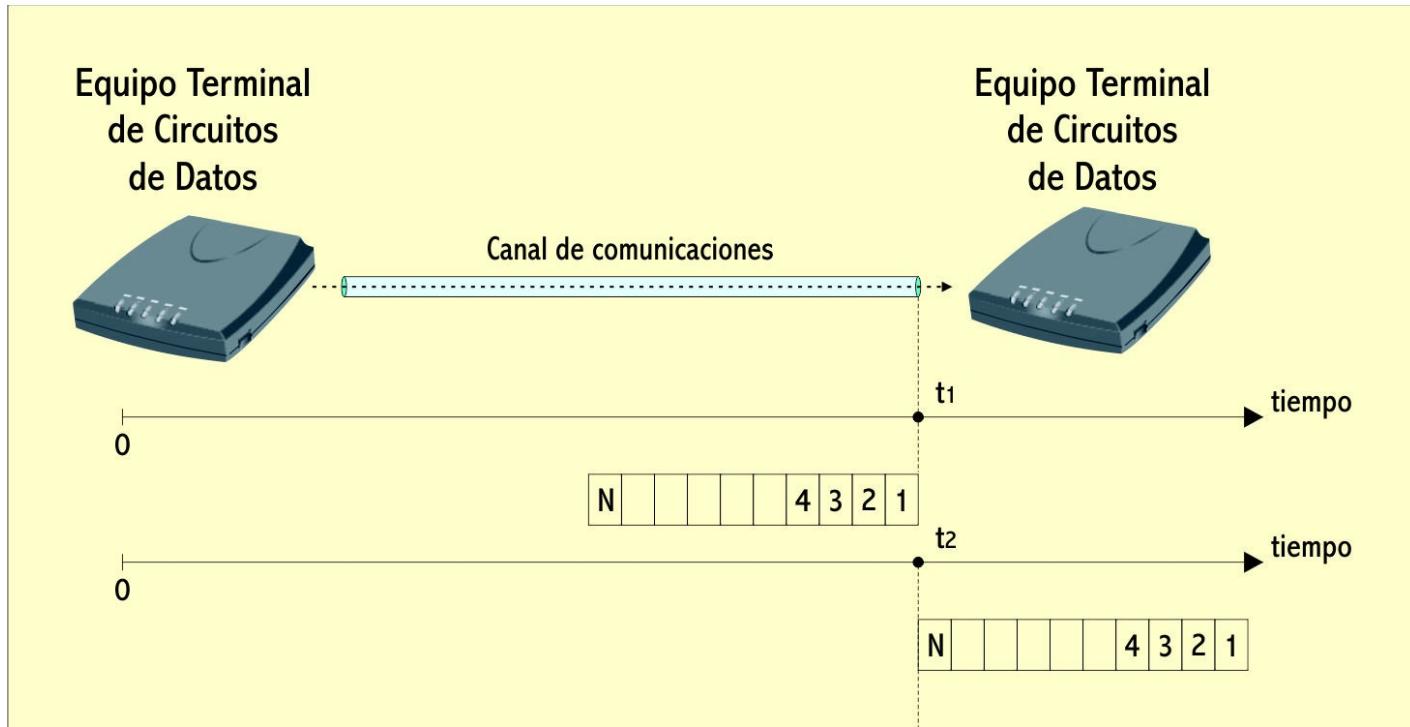
- t_1 : instante de tiempo en que el primer bit sale del canal
- t_2 : momento en que lo abandona el último bit

El ancho de banda en ese canal resultará:

$$\Delta f = \frac{Q \text{ [bit]}}{t_2 - t_1 \text{ [seg]}} = bps$$



La expresión mide el ancho de banda utilizado.
El vínculo podría tener un ancho de banda aun mayor.
Los equipos terminales del circuito de datos pueden limitarlo.





3.4.4 Conceptos de retardo, latencia y jitter. Su relación con el ancho de banda

Todo canal de comunicaciones tiene un retardo en la transmisión de la información.

La información no se transmite a una velocidad infinita cualquiera sea el medio de comunicaciones elegido.

En un medio dieléctrico como es el vacío, lo hará a una velocidad aproximada de *300.000 km/seg.*

El retardo de transmisión estará condicionado por el medio de comunicaciones utilizado.



Retardo de transmisión (R_t) es el tiempo que empleará la señal de comunicaciones para cubrir una distancia dada.

$$R_t = \frac{\text{distancia}}{\text{velocidad de propagación}}$$

El retardo será una función de la velocidad de propagación de la señal, y ésta del medio que se utilice.



Las comunicaciones son muy sensibles al retardo.

El tiempo total que demora una transferencia de datos depende de:

- la demora en recorrer el camino físico
- el procesamiento en los nodos
- las colas de espera
- la saturación de buffers
- la congestión en distintas partes de la red.



El concepto de latencia combina:

- el ancho de banda del canal
- los retardos que se pueden producir por distintas causas.

Sea t_2 al instante del tiempo en que el último bit de la trama sale del canal

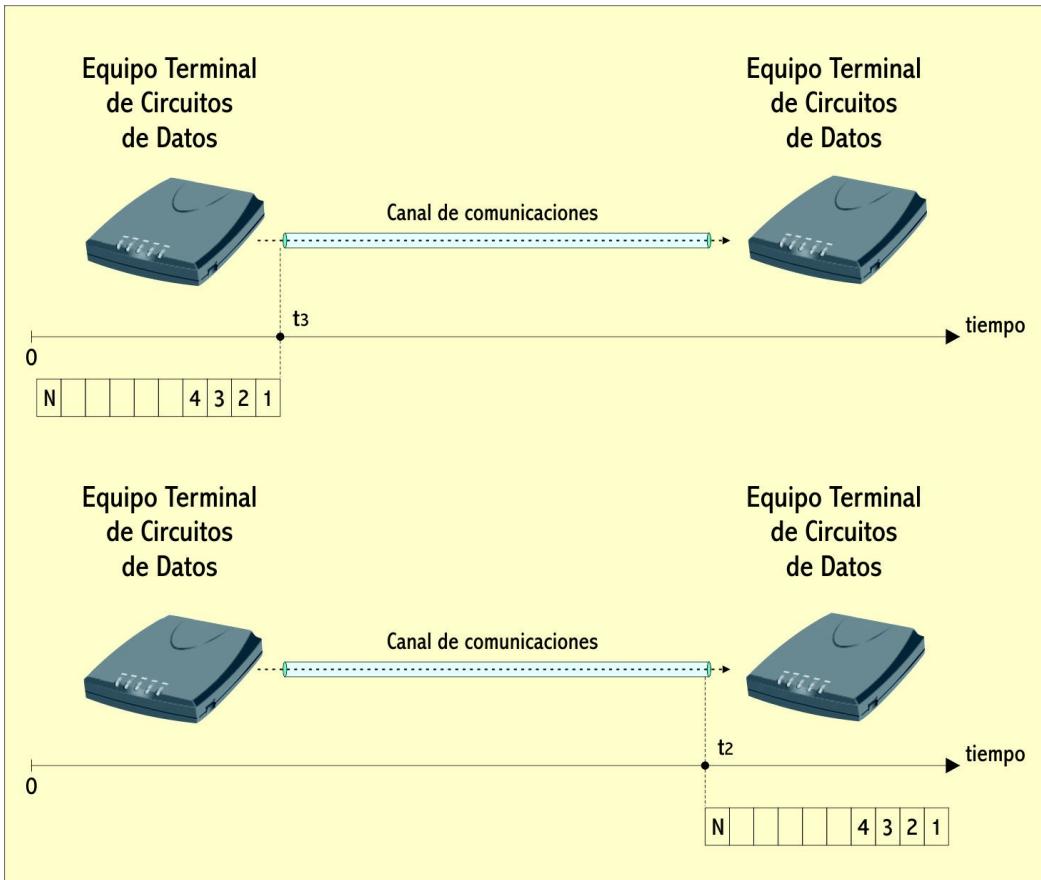
Sea t_3 al instante en que el primer bit de ella entró en él.

Latencia de un canal: intervalo de tiempo transcurrido entre el instante en que el primer bit de trama entró en el canal menos el instante de tiempo en que el último bit salió de él.

$$\Delta T = t_3 - t_2$$



Retardo total en canales digitales.





3.5 Canales de comunicaciones

3.5.1 Conceptos generales

El concepto de canal de comunicaciones hace al enlace físico y también a una conexión lógica.

Una red de comunicaciones está formada por un conjunto de canales de comunicaciones.

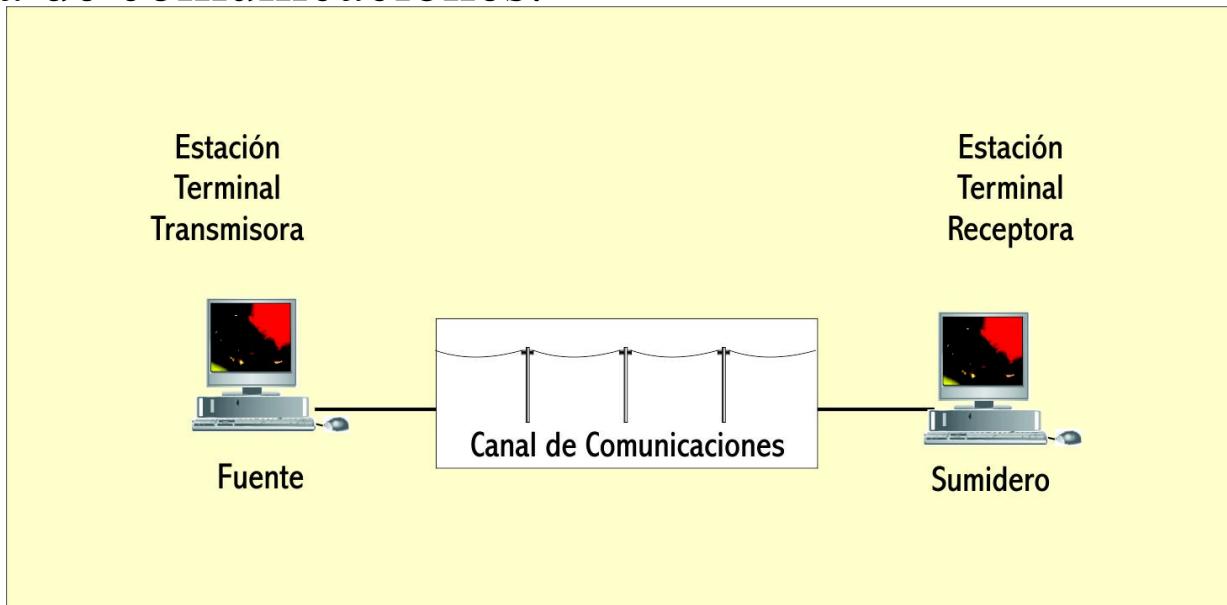
Cada usuario debe poseer un equipo terminal que satisfaga sus necesidades de comunicación y un medio físico que los una.



3.5.2 Canal físico

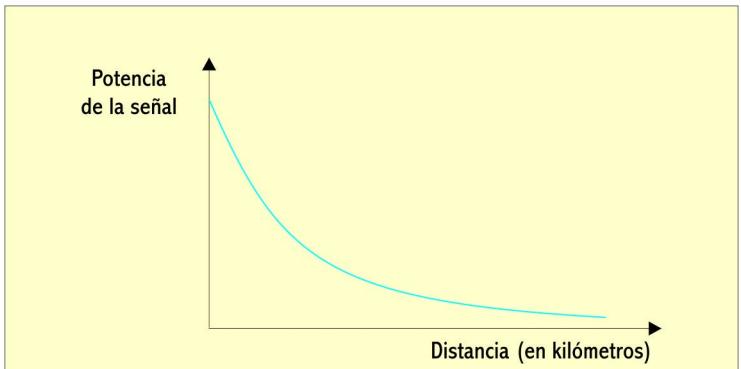
Es la parte del canal de comunicaciones que tiene que ver con las características físicas y eléctricas del medio de transmisión.

Está vinculado a las características físicas del medio y las técnicas de la ingeniería de comunicaciones.

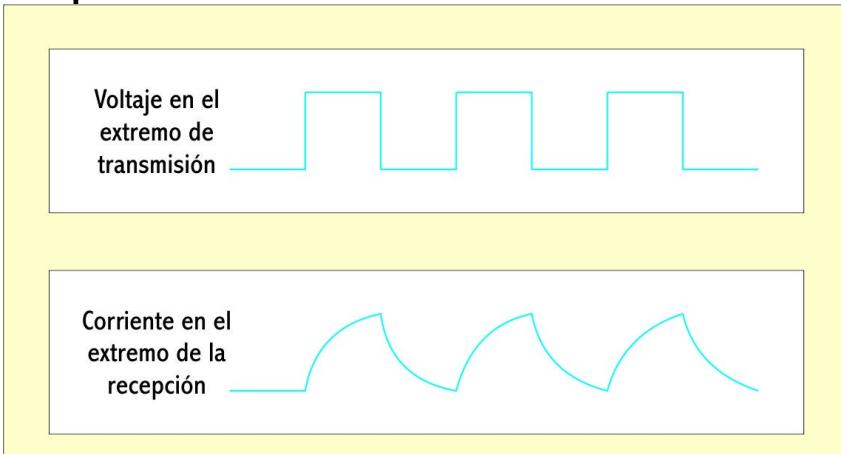




Pérdida de potencia de una señal por atenuación.

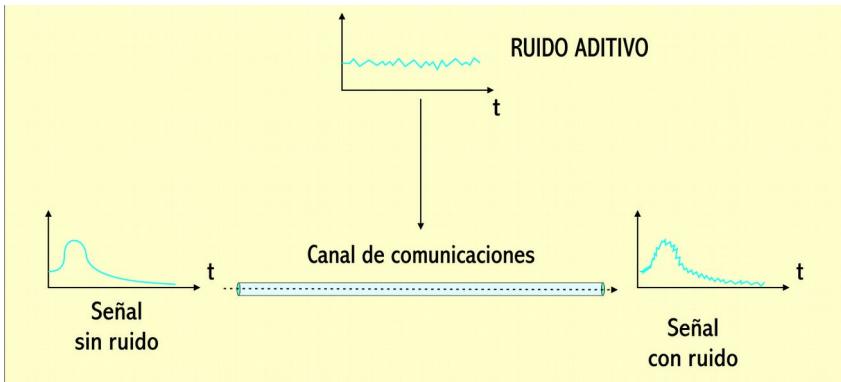


Distorsión de la señal por efecto reactivo.

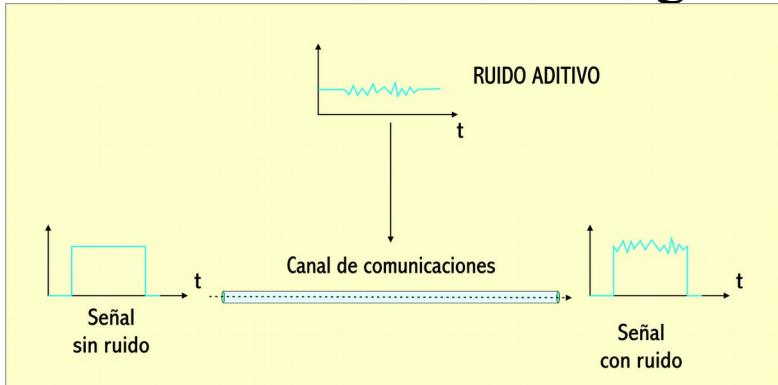




Efecto aditivo del ruido sobre una señal analógica.



Efecto aditivo del ruido sobre una señal digital.





3.5.3 Canal de información

Es la parte del canal de comunicaciones que tiene que ver con las especificaciones técnicas y lógicas que hacen a la transmisión de la inteligencia.

Está vinculado a la teoría de la información y la codificación.

Se ocupa básicamente de evaluar y permitir administrar los recursos del canal físico de manera adecuada.

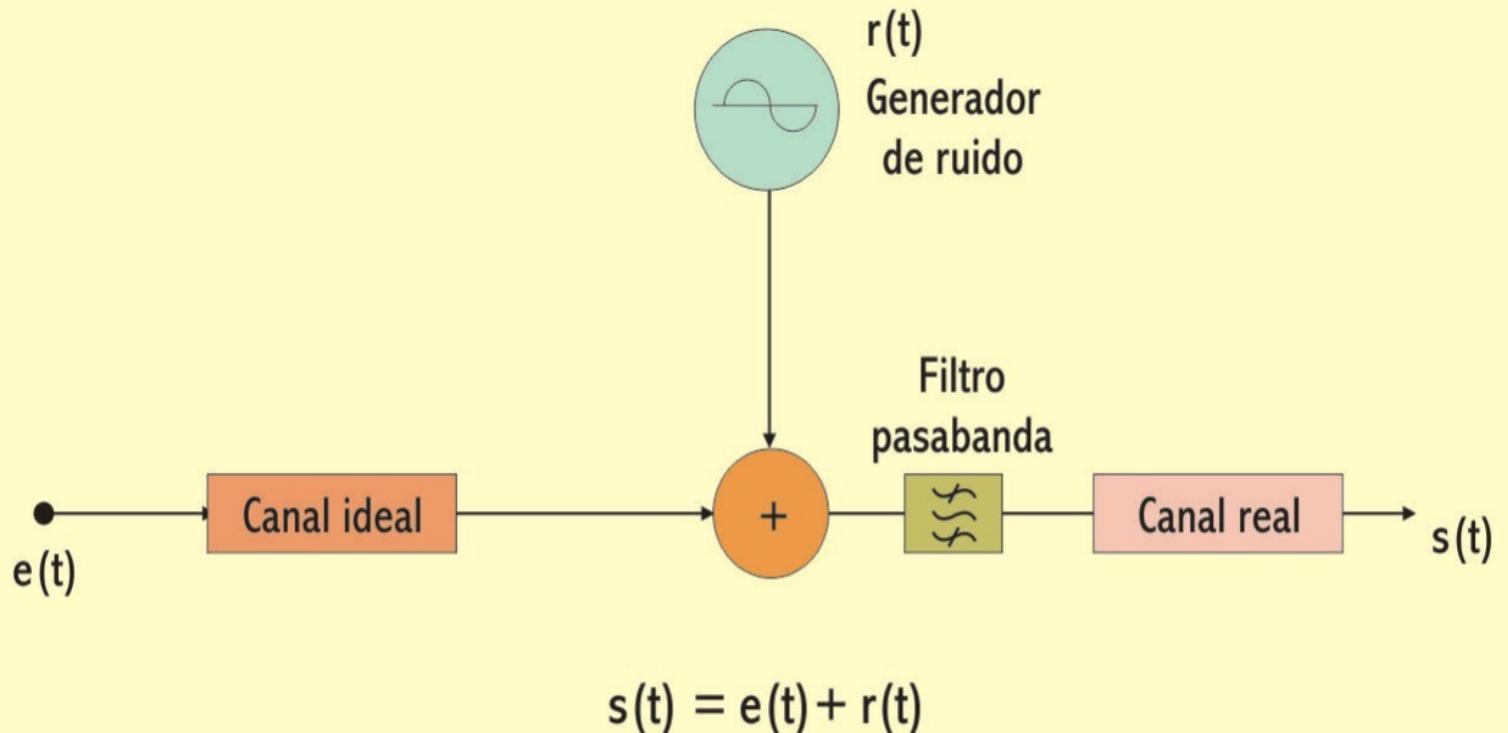
Usa como criterio de eficiencia la velocidad de transmisión de la información y la calidad con que esta se transporta.



3.5.4 Canal ideal y canal real

Canal ideal: concepto teórico que se utiliza como una abstracción
Es aquel canal de comunicaciones que al aplicársele en la entrada
una señal continua, reproduce en su salida exactamente la misma
señal.

Los canales reales logran ese objetivo solo de manera aproximada.
El ruido (que tiene características aditivas, respecto de la señal útil)
modifica la forma de la onda de entrada en el canal.





3.5.5 Canales analógicos y canales digitales

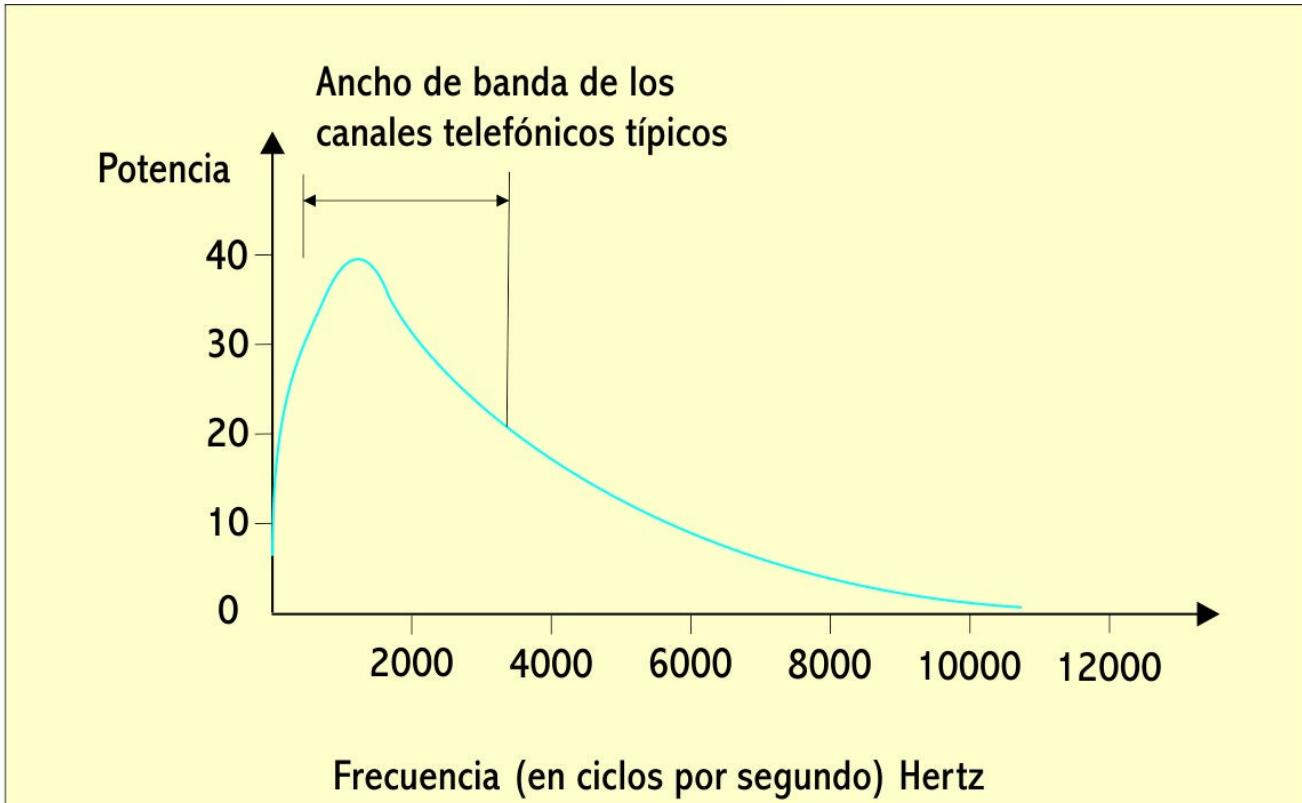
Según el tipo de señales que transporten, los canales se pueden clasificar en analógicos o digitales.

Canales analógicos actualmente usados:

- red telefónica conmutada para señales de voz entre la central y los teléfonos
- redes de distribución de señales de televisión por cable (CATV)
- pares telefónicos para la provisión del servicio de banda ancha.



Potencia de una señal de frecuencia vocal en función de la frecuencia.





3.5.6 Concepto de relación señal a ruido. Factor de ruido

Relación señal a ruido (en decibeles) es la relación entre la potencia de la señal y la potencia de ruido.

$$\text{Relación señal / ruido} = 10 \log_2 \frac{S}{N}$$

donde:

S = potencia media de la señal útil.

N = potencia media de ruido.

Para los canales de comunicaciones y los amplificadores se usa el **factor de ruido**:

$$F = \frac{\text{relación señal / ruido de entrada}}{\text{relación señal / ruido de salida}}$$



De acuerdo con la expresión el factor de ruido, resultará:

$$F = \frac{S_1 / N_1}{S_1 / N_2}$$

Como la potencia de la señal a la salida será igual a su potencia a la entrada por la ganancia del amplificador:

$$S_2 = S_1 \cdot G$$

Reemplazando:

$$F = \frac{S_1 / N_1}{S_1 G / N_2}$$

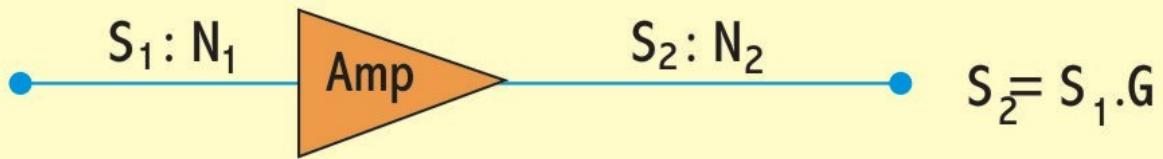
Simplificando:

$$F = \frac{N_2}{G / N_1}$$



S_1 = Señal de Entrada

S_2 = Señal de Salida



N_1 = Ruido de Entrada

N_2 = Ruido de Salida

Donde:

Relación S/R = Sn/Rn

G = Ganancia del amplificador

S_1 = Señal de entrada

S_2 = Señal de salida

N_1 = Ruido de entrada

N_2 = Ruido de salida



3.5.7 Acondicionamiento de los canales de comunicaciones

3.5.7.1 Aspectos generales

Los canales presentan fenómenos físicos que alteran sus características:

- señales de retorno denominadas **eco**
- atenuación y la distorsión

Estos fenómenos:

- producen un comportamiento no lineal de la curva de respuesta en frecuencia.
- obligan a introducir equipos especiales en el canal de comunicaciones.



3.5.7.2 Eco

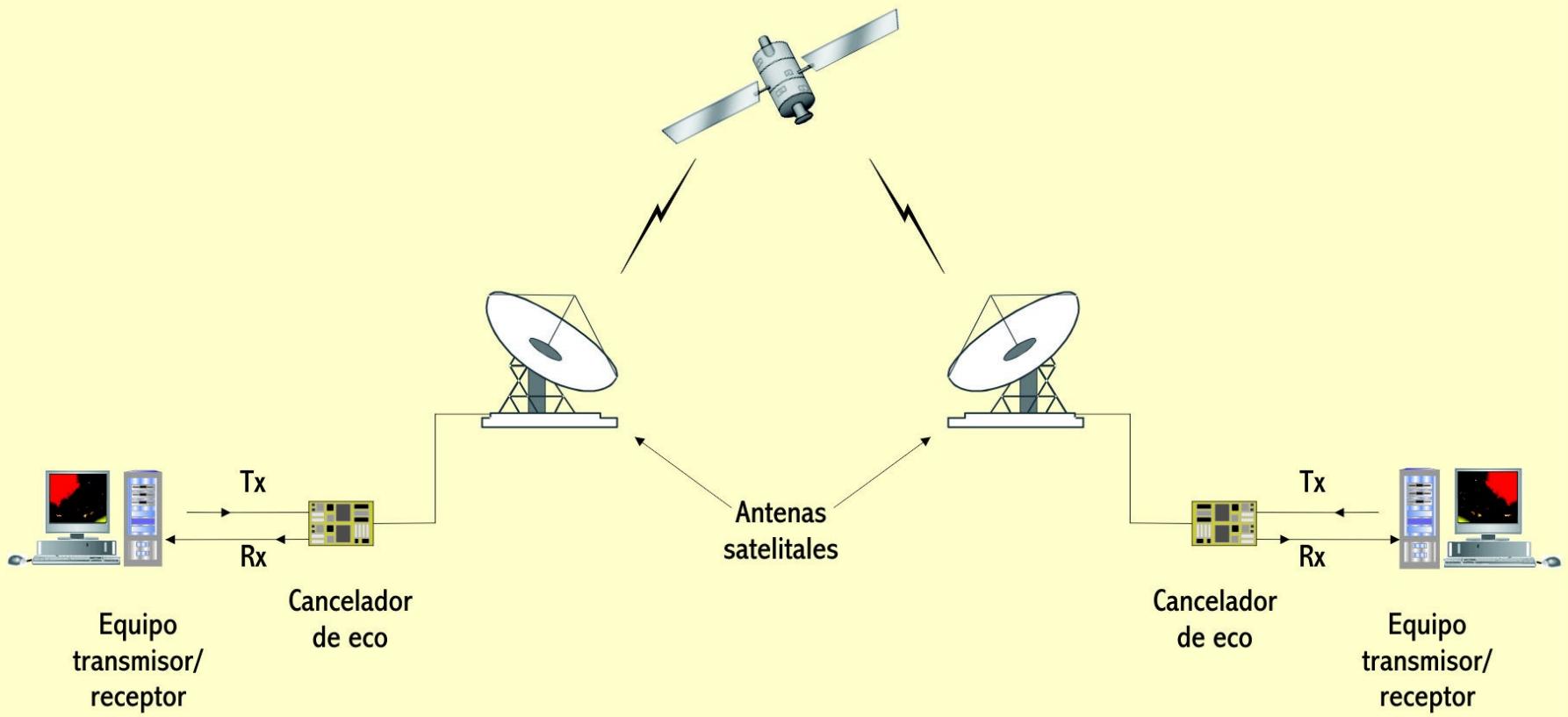
Es una señal no deseada que se origina por medio de una onda reflejada en el colector, producida por la propia señal generada en el equipo terminal.

También lo causan ciertos obstáculos por desacoplamientos en las impedancias del circuito.

El eco es el reflejo de la energía de las propias señales generadas en la fuente.



Satélite de comunicaciones





3.5.7.3 *Ecualización*

Proceso de compensación de un canal de comunicaciones de los efectos que produce la distorsión (atenuación o de retardo de grupo).

Los ecualizadores pueden formar parte de los módem de datos.
Pueden ser de atenuación o de fase.



3.6 Capacidad de un canal

3.6.1 Elementos de teoría de la información. Medida de la información

Las redes de comunicaciones tienen por objeto intercambiar información.

Mensaje: conjunto de datos que proviene de una fuente de información.



La teoría de la información estudia cuatro aspectos:

- Cómo se mide la información.
- Cuál es la capacidad de un canal de comunicaciones para transferir información.
- Otros aspectos relacionados con la codificación de la información.
- La manera de utilizar los canales a plena capacidad con una tasa de error mínima.

Un hecho que se sabe con seguridad que va a ocurrir no contiene información alguna.

Un suceso contendrá mayor cantidad de información cuanto menor sea la probabilidad de que se produzca.



Información es un conjunto de datos que permiten aclarar algo sobre aquello que se desconoce.

Para medir la cantidad de información que contiene el suceso descripto en un mensaje:

- sea un suceso S que se pueda presentar con una probabilidad de ocurrencia $P(S)$
- la cantidad de información de que contiene ese suceso será igual a la inversa del logaritmo de la probabilidad de que ese suceso se produzca

$$I(S) = \log_2 \frac{1}{P(S)} \text{ [Shannon]}$$



La base del logaritmo determina la unidad con la que se medirá:

- Si tomamos logaritmo en base 2, la unidad es el Shannon.
- Si se tomara el logaritmo decimal, la unidad es el Hartley.
- Si se toma el logaritmo natural (base e), la unidad es el Nat.

$$I(S) = \log_{10} \frac{1}{P(S)} \text{ [Hartley]}$$

$$I(S) = \log_e \frac{1}{P(S)} \text{ [Nat]}$$



3.6.2 Entropía

3.6.2.1 Fuente de memoria nula

Fuente de memoria nula: es la que emite símbolos que son estadísticamente independientes uno de otro.

Supongamos que una fuente de memoria nula puede emitir distintos símbolos, cada uno de ellos con cierta probabilidad asociada.

Variable aleatoria: es una función $I(x_k)$ en la cual:

- para cada valor de la variable x
- hay un valor de probabilidades p_k .



3.6.2.2 Definición de entropía

Sea una variable aleatoria definida como se muestra en la tabla

Variable Aleatoria	$I_{(x)}$	X_1	X_2	X_k	X_{k+1}
Probabilidad	$P_{(k)}$	$P_{(X_1)}$	$P_{(X_2)}$	$P_{(X_k)}$	$P_{(X_{k+1})}$

Esperanza matemática de la variable aleatoria será:

$$E(X_k) = \sum_{k=1}^n I(X_k)P(X_k)$$

Cantidad de información en Shannon de la variable aleatoria será:

$$I(X_k) = \log_2 \frac{1}{P(X_k)}$$

Operando:

$$I(X_k) = -\log_2 P(X_k)$$



Reemplazando:

$$E(x_k) = -\sum_{k=1}^n \log_2 P(x_k) p(x_k)$$

Entropía de una fuente de memoria nula H:

$$H = -\sum_{k=1}^n \log_2 P(x_k) p(x_k)$$

Se mide en $H = \text{Shannon/símbolo}$

Representa la incertidumbre media en la probabilidad de que se produzca cada símbolo.



3.6.2.3 Propiedades de la entropía

Pequeños cambios en la probabilidad de un suceso, implican pequeñas alteraciones en la cantidad de información.

- Simetría.

El orden en que se presentan los distintos sucesos no altera la entropía del sistema.

- Aditividad.

Las entropías de distintas partes de un mismo sistema se pueden sumar.

- Maximilidad.

Se puede demostrar que la entropía es una función maximizable.

Si los símbolos que genera una fuente de memoria nula son equiprobables, entonces la entropía es máxima.



Si es:

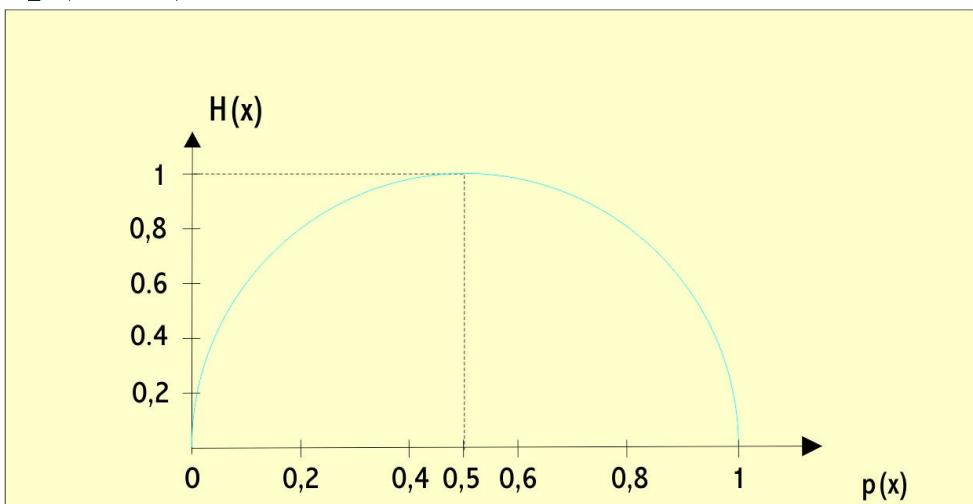
$$p(x_1) = p(x_2) = p(x_3) = p(x_4) = \dots = p(x_N) = \frac{1}{N}$$

Entonces la fuente de memoria nula puede emitir N símbolos con igual probabilidad.

La entropía tiene valor máximo: $H = \log_2 N$ Shannon / símbolo

La función entropía de una fuente binaria [1 o 0] de memoria nula donde :

- el símbolo 1 se presente con probabilidad igual a $p(x)$
- el símbolo 0, con $p(1 - x)$.





3.6.3 Capacidad de un canal

Se relaciona con la velocidad de transmisión máxima en bps que puede admitir.

Es la máxima velocidad de transmisión de datos que se pueden cursar por el canal libres de errores.

$$C = V_{\max} \text{ [bps]}$$

C = capacidad de un canal.

V_{\max} = velocidad de transmisión de datos máxima.

Los canales reales siempre tendrán errores.

Son del tipo AWGN (canales con ruido blanco gaussiano aditivo).



3.6.4 Tasa de información o velocidad de información

3.6.4.1 Definición y conceptos básicos

Varias fuentes pueden tener la misma entropía pero si una de ellas es más rápida que las demás, introduce en el canal de comunicaciones mayor cantidad de información.

La descripción de la fuente dependerá no solo de la entropía, sino también de la denominada tasa de información.



Tasa de información (Γ): cociente entre la entropía de la fuente y la duración media de los símbolos que envía:

$$\Gamma = \frac{H(x)}{\tau}$$

Donde:

τ = duración media de los símbolos.

En unidades, resultará,

$$[\Gamma] = \frac{[\text{Shannon} \cdot \text{símbolo}]}{\frac{[\text{segundo}]}{\text{símbolo}}}$$

Simplificando,

$$[\Gamma] = \frac{[\text{Shannon}]}{[\text{segundo}]}$$



3.6.4.2 Relación entre la capacidad de un canal y la velocidad de transmisión

La tasa de información representa la cantidad de información producida por una fuente en un tiempo determinado.

La capacidad de un canal **C** medida en bps nos indica la cantidad de información que el canal puede transportar por unidad de tiempo en un canal real.



3.6.5 Uso de la medida de la información

Con *1 bit* es posible identificar en forma unívoca dos situaciones posibles (un *1*, y un *0*).

Para determinar cuántos bits se necesitan para efectuar una elección entre todas las que sean posibles utilizando *1, 2, 3, ... Bits*:

$$n = 2^M$$

donde:

n = número de posibilidades a elegir.

M = número de bits necesarios para discriminar entre *n* posibilidades.

	Cantidad de bits	Distancia de Hamming
1	1	2
2	2	4
3	3	8
4	4	16
5	5	32
6	6	64
7	7	128
8	8	256



3.7 Concepto de velocidad máxima de transmisión

3.7.1 Teorema de Nyquist

Para un canal ideal (sin ruido) no se puede sobrepasar una velocidad de pulsos máxima, función de la frecuencia máxima de transmisión.

Sea una señal limitada en su ancho de banda y con una frecuencia máxima $f_{\text{máx}}$, entonces,

Donde:

$$f_N = \text{frecuencia de Nyquist o de muestreo.} \quad f_N > 2f_{\text{máx}}$$

Si la señal a participar del muestreo está definida en un ancho de banda Δf , entonces la frecuencia de muestreo será igual a

$$f_N = 2\Delta f$$



La capacidad de un canal sin ruido de ancho de banda finito Δf resulta cuando se envían señales binarias igual a

$$C = V_{\text{máx}} = 2 \Delta f \text{ [bps]}$$

Donde:

C = capacidad del canal.

$V_{\text{máx}}$ = velocidad máxima de transmisión de datos con señales binarias.

Δf = ancho de banda de la señal.

Para señales multinivel, la capacidad de un canal ideal es:

$$C = V_{\text{máx}}^M = 2 \Delta f \log_2 n \text{ [bps]}$$



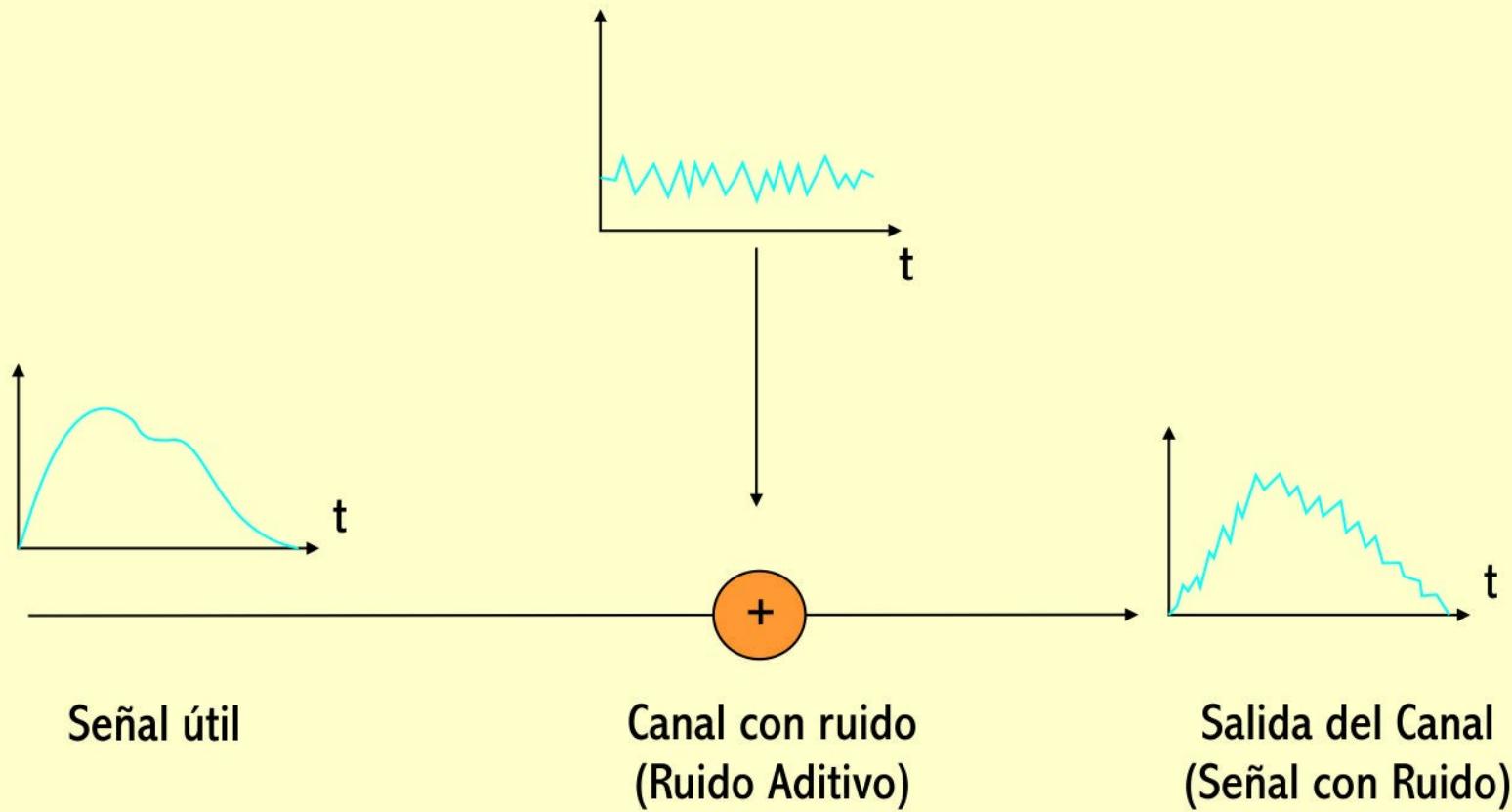
3.7.2 Teorema de Shannon-Hartley

Si un canal fuese ideal, se podría aumentar de manera indefinida la capacidad con solo incrementar el número de niveles de la señal.

En los canales reales continuos hay ruido blanco gaussiano aditivo.

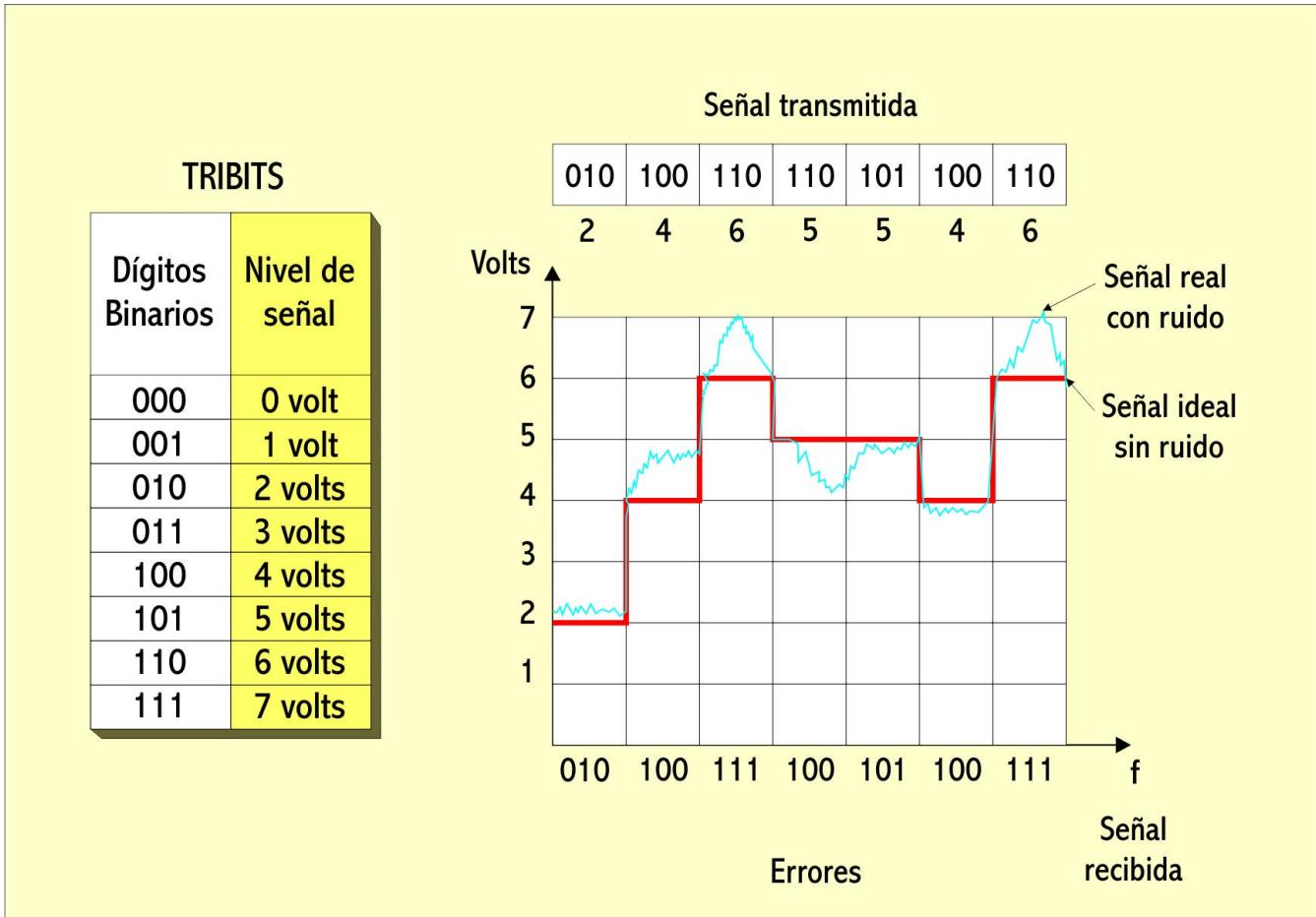


Características de aditividad del ruido.





Limitación del número de niveles de una señal en función del ruido.





En efecto:

$$\frac{S}{N} = \frac{\text{Potencia de la señal}}{\text{Potencia del ruido}}$$

Para establecer la capacidad de un canal con ruido hay que determinar cuál es el valor máximo que podrá tomar n (número de estados de la señal).

En efecto,

$$C = V_{\max}^M \log_2 n_{\max} \text{ [bps]}$$

Shannon demostró que el número máximo de niveles tiene que ver con la relación señal/ruido:

$$n_{\max} = \left(1 + \frac{S}{N}\right)^{1/2}$$



Reemplazando:

$$C = 2 \Delta f \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)^{1/2} [\text{bps}]$$

Simplificando:

$$C = \Delta f \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)^{1/2} [\text{bps}]$$

donde:

S = potencia media de la señal continua transmitida por el canal.

N = potencia media ruido blanco gaussiano aditivo.

Δf = ancho de banda del canal de comunicaciones.

La ley de Shannon-Hartley determina la capacidad de un canal continuo que tiene un ancho de banda Δf y ruido blanco gaussiano aditivo limitado en banda.

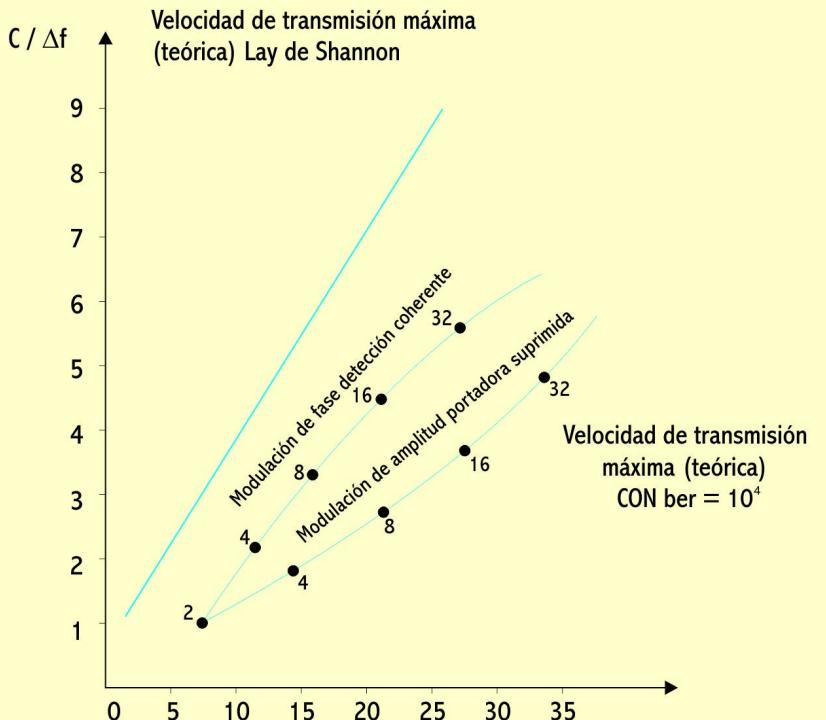


3.7.3 Consideraciones particulares sobre el teorema de Shannon-Hartley

El teorema de Shannon-Hartley es de importancia fundamental para el análisis de los sistemas de comunicaciones.

Tiene dos aspectos relevantes:

- Permite calcular la velocidad máxima de transmisión de datos en un canal con ruido (con distribución estadística de tipo gaussiano).
- Relaciona dos parámetros fundamentales en todo canal de comunicaciones, que son el ancho de banda Δf y la relación señal/ruido S/N .



Notas:

$C/\Delta f$ = Número de bps transmitidos por unidad de ancho de banda usada.
S/N : Relación señal/ruido existente en el canal de comunicaciones.



3.8 Ruido

3.8.1 Aspectos generales

El ruido y la distorsión son fenómenos adversos para la propagación de señales.

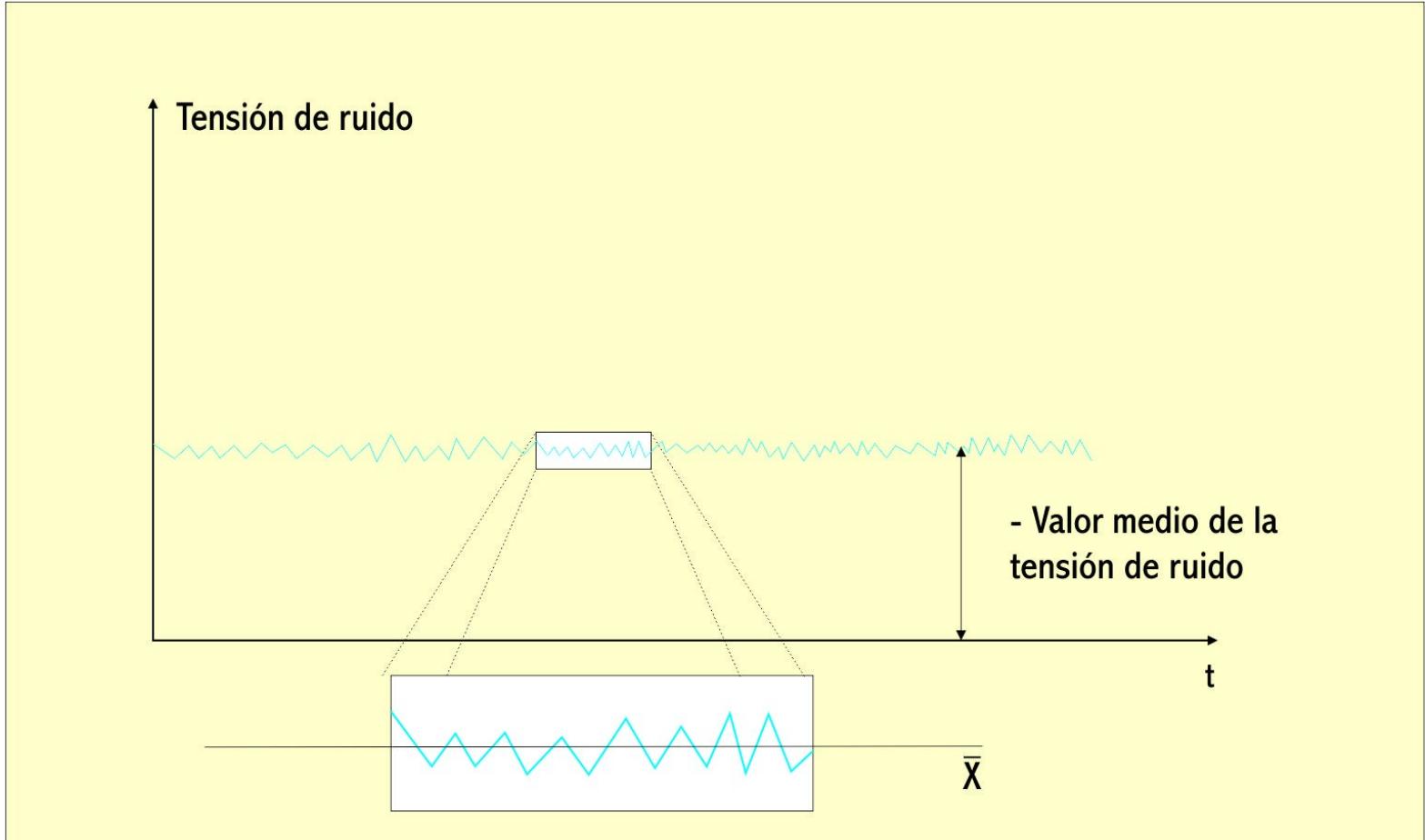
Hay dos parámetros básicos :

- La relación señal a ruido en los sistemas analógicos.
- La tasa de error en los sistemas digitales.

Ruido: todo fenómeno que, adicionado a la señal que se transporta desde la fuente, afecta la calidad de la información recibida en el colector.



Forma de onda de ruido típica.





3.8.2 Clasificación del ruido con respecto al sistema de comunicaciones

Hay dos tipos de ruido:

- endógeno (proviene de elementos propios que no pueden ser controlados)
- exógeno (es ajeno al sistema pero se acopla)



3.8.3 Distintos tipos de ruido

3.8.3.1 Introducción

El ruido se puede clasificar en función de:

- los agentes que lo producen
- los efectos nocivos que causan



3.8.3.2 Ruido blanco, gaussiano o de Johnson

El movimiento de las partículas cargadas en los conductores hacen que estos cuerpos irradién energía en forma de ondas electromagnéticas.

La potencia radiada es proporcional a la temperatura absoluta a la que se encuentran las partículas.



Cada partícula en movimiento tendrá una energía cinética que será proporcional a la temperatura absoluta, y a la constante de Boltzmann.

Para el ruido generado por la resistencia de un conductor la potencia de ruido térmico además será proporcional al ancho de banda del canal.

La energía de ruido térmico es:

Donde:

$$ER = \text{potencia del ruido en Watt.} \quad E_R = \Delta f \ k \ T$$

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Joule/Kelvin} .$$

$$T = \text{grados Kelvin.}$$

$$\Delta f = \text{ancho de banda [Hz].}$$



El valor de la resistencia del circuito no desempeña papel alguno en la generación de la potencia de ruido.

La energía del ruido térmico en función del ancho de banda de la ecuación resultará igual a

$$\frac{E_R}{\Delta f} = kT$$

En términos dimensionales resultará,

$$\frac{[E_R]}{[Hz]} = [Joule][seg] = [Watt]$$

Reemplazando:

$$P_R = \frac{E_R}{H_Z}$$

Potencia del ruido térmico:

$$P_R = \frac{E_R}{seg}$$

Reemplazando;

$$P_R = kT$$



Expresando en *dBm*: $dBm = 10 \log \frac{P_s[mW]}{1mW}$ $P_R[dBm] = 10 \log k + 10 \log T$

Potencia de ruido en *dBm* por Hz de ancho de banda para una temperatura de $20^\circ C$:

$$P_R[dBm] = 10 \log (1,38 \cdot 10^{-23}) + 10 \log (273 + 20) \quad P_R[dBm] = -228,6 + 24,66 \cong -204 \text{ dBm}$$

Si consideramos la temperatura de $20^\circ C$ como un valor ambiente normal, para valores de anchos de banda diferentes a *1 Hz*:

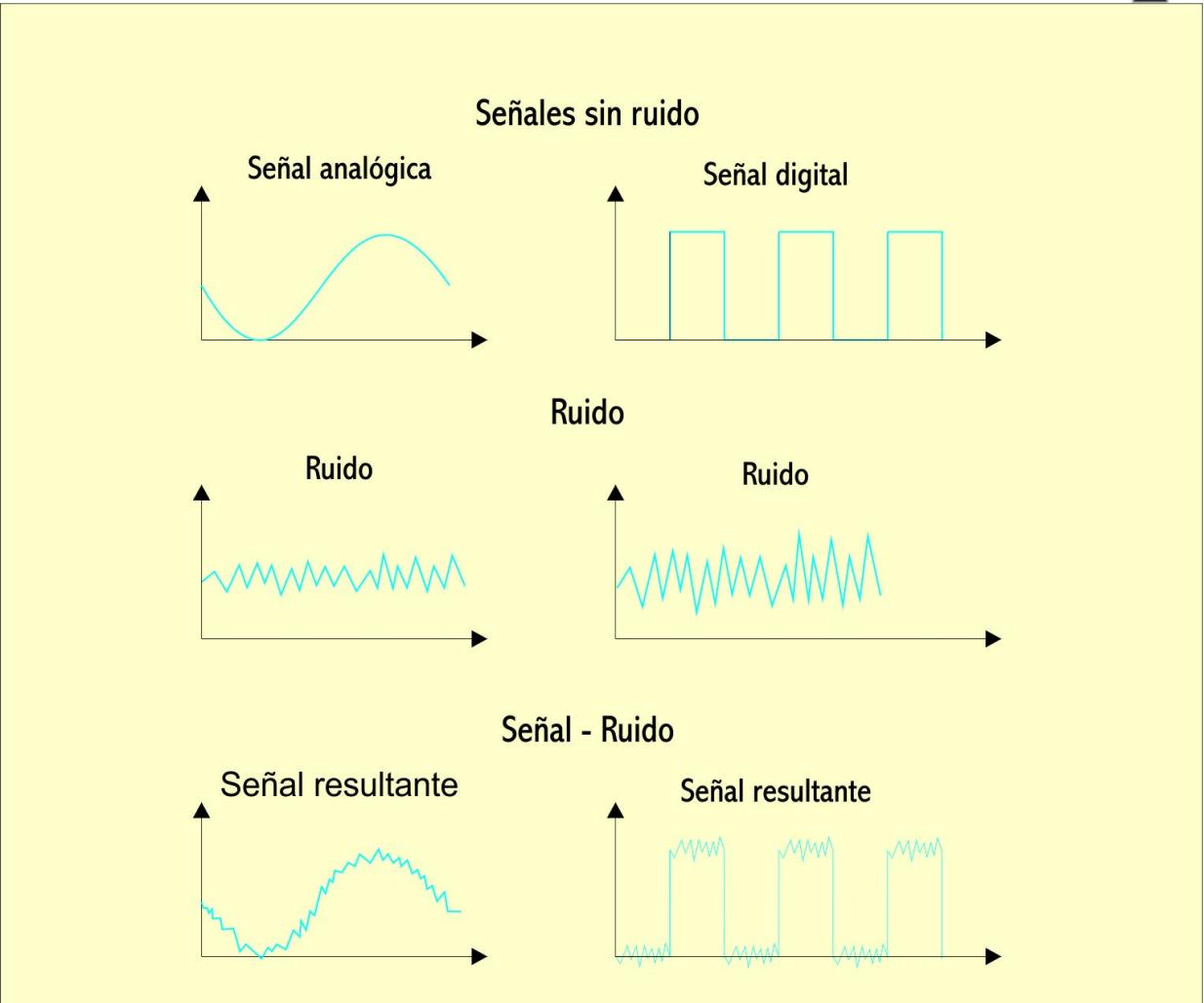
$$P_R[dBm] = -204 \text{ dBm} + 10 \log \Delta f$$

Para otras temperaturas:

$$P_R[dBm] = -228,6 + 10 \log T + 10 \log \Delta f$$

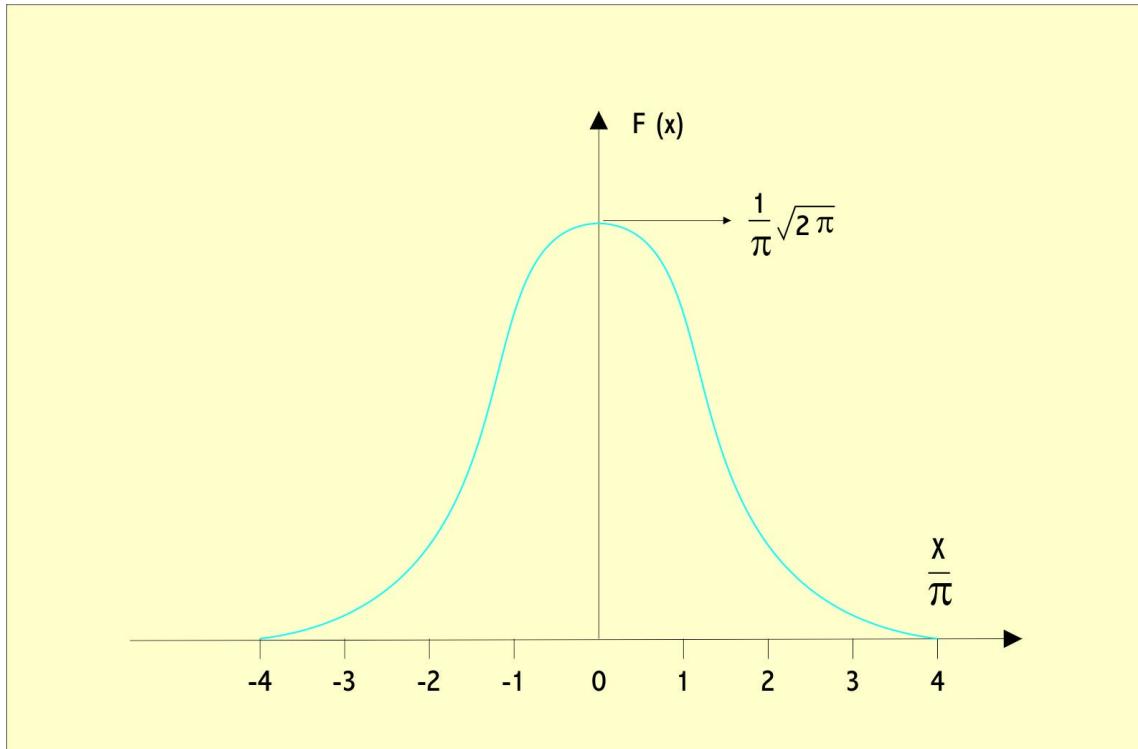


Efectos del ruido blanco sobre las señales: se suma a la señal a transmitir formando un *ruido de fondo* de bajo nivel, que puede llegar a producir errores si los niveles de la señal útil son bajos.





La distribución normal permite hallar la probabilidad de que la onda de ruido alcance un valor particular en un instante determinado. Por la distribución de Gauss siempre habrá una probabilidad finita, aunque pequeña, de que se pueda exceder cualquier nivel.





3.8.3.3 Ruido impulsivo

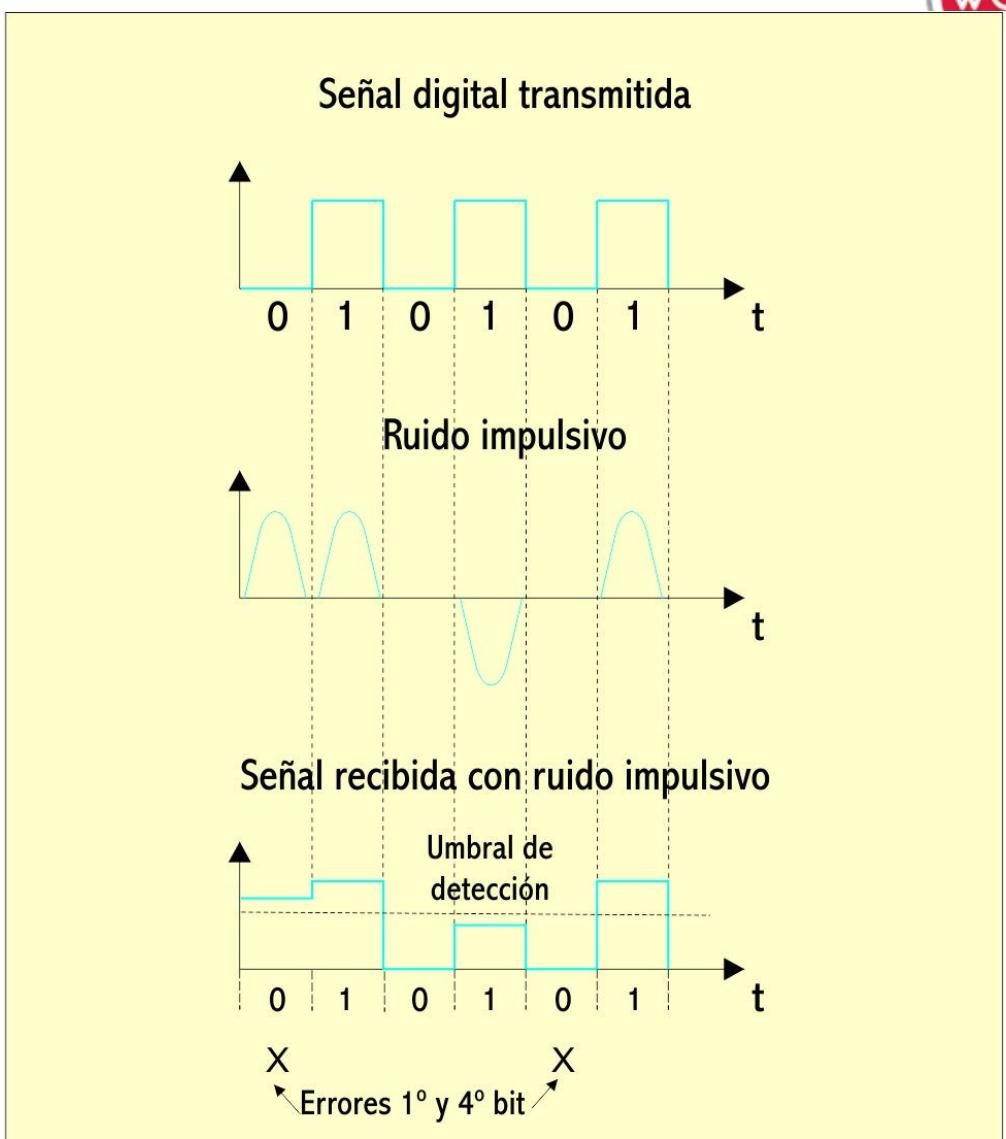
Se produce a intervalos irregulares:

- picos de corta duración pero de gran amplitud
- no aparece en forma continua

No produce efectos importantes en los canales analógicos.

Puede ser muy alto en las centrales telefónicas de tecnología electromecánica.

Efecto del ruido impulsivo en transmisiones digitales.





3.8.3.4 Ruido de intermodulación

Se produce cuando:

- se aplican varias señales senoidales a un dispositivo no lineal
- si varias señales multiplexadas en frecuencia por el mismo canal sufren desplazamientos de sus portadoras
- ocupan las bandas de protección y se enciman a las señales contiguas.



3.8.3.5 Diafonía

Se produce por el acoplamiento indeseado entre dos señales a causa de la inducción electromagnética mutua.

Se conoce como *crosstalk*.



3.8.3.6 Ruido de línea o simple

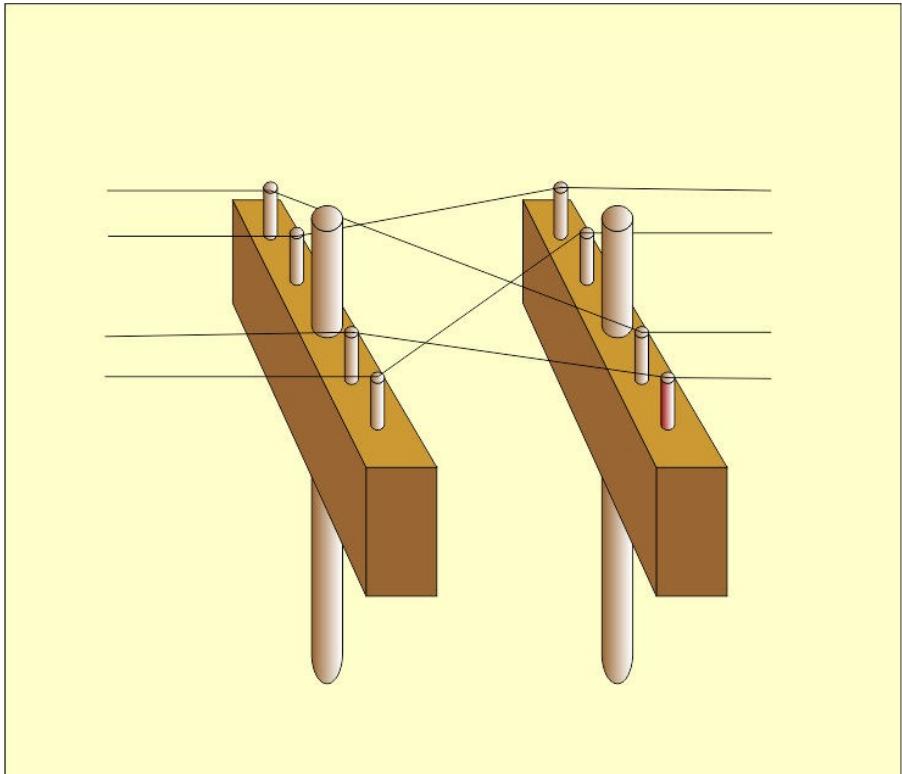
Se produce por la presencia de líneas eléctricas de energía para iluminación y alimentación de equipos y/o sistemas eléctricos y electrónicos.

Cuando estas líneas están cerca hay inducción electromagnética que afecta las transmisiones de señales.

Para reducir este efecto se hacen trasposiciones de fase que mejoran la simetría.



Esquema de una trasposición en un tendido aéreo de cables de cobre.





3.9 Distorsión

3.9.1 Definición y conceptos generales

Es la deformación que sufre una señal eléctrica.

Puede ser causada por elementos internos o externos.

La distorsión puede producirse por varias causas:

- Por atenuación
- Por retardo de grupo
- Por efectos meteorológicos



3.9.2 Distorsión por atenuación

Llamaremos distorsión por atenuación a la que se produce a causa de las características resistivas y reactivas del canal físico de comunicaciones.

Si recordamos la expresión podemos observar que la impedancia de un canal de comunicaciones se puede expresar mediante un número complejo Z , *tal que*

$$Z = R + j (X_L - X_C)$$

donde:

R = *resistencia óhmica.*

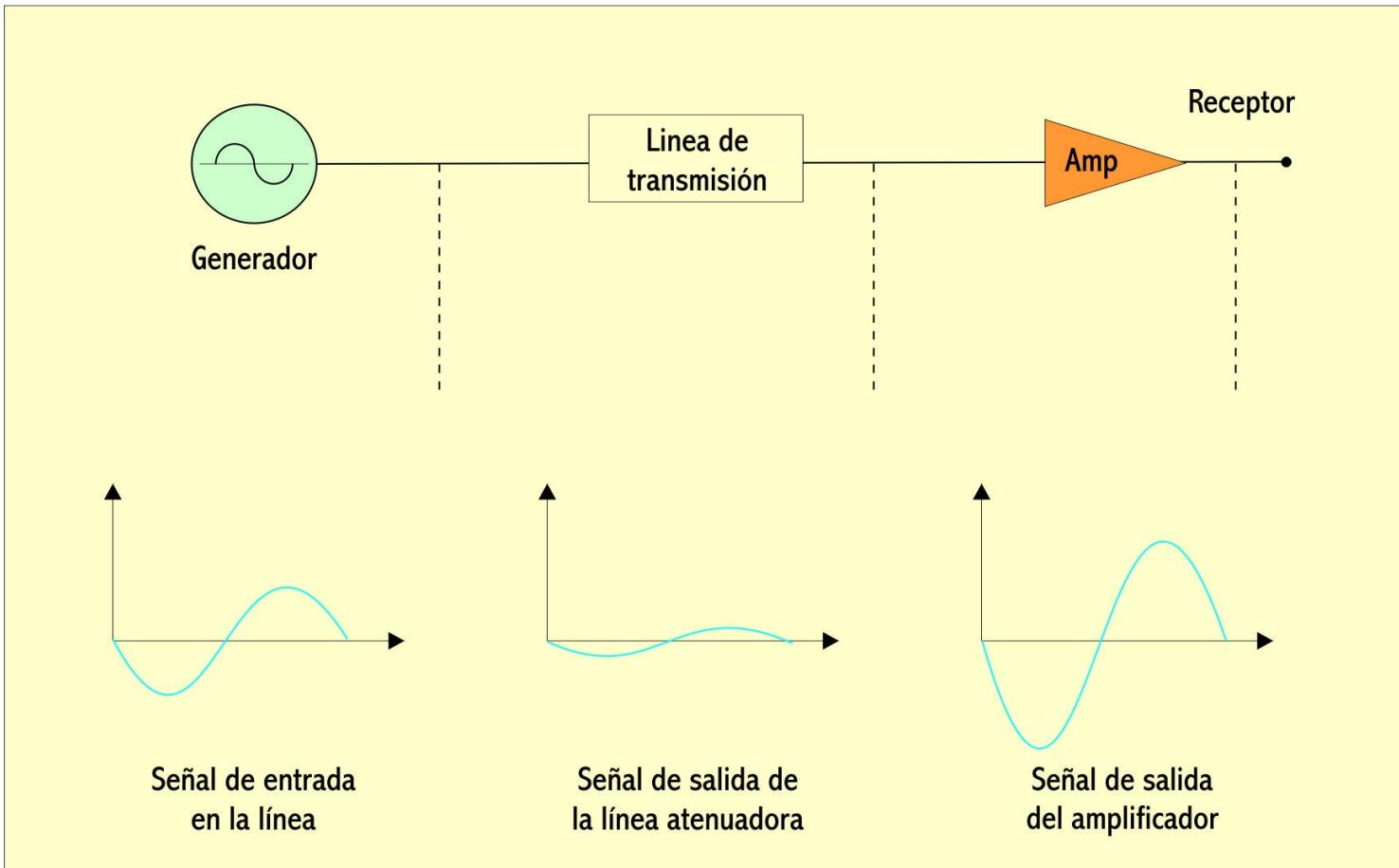
j = *unidad imaginaria.*

X_L = *reactancia inductiva.*

X_C = *reactancia capacitiva.*



Efectos de la resistencia eléctrica en una línea de transmisión





El valor de las reactancias inductiva y capacitiva es función de la frecuencia:

$$X_L = 2\pi fL$$

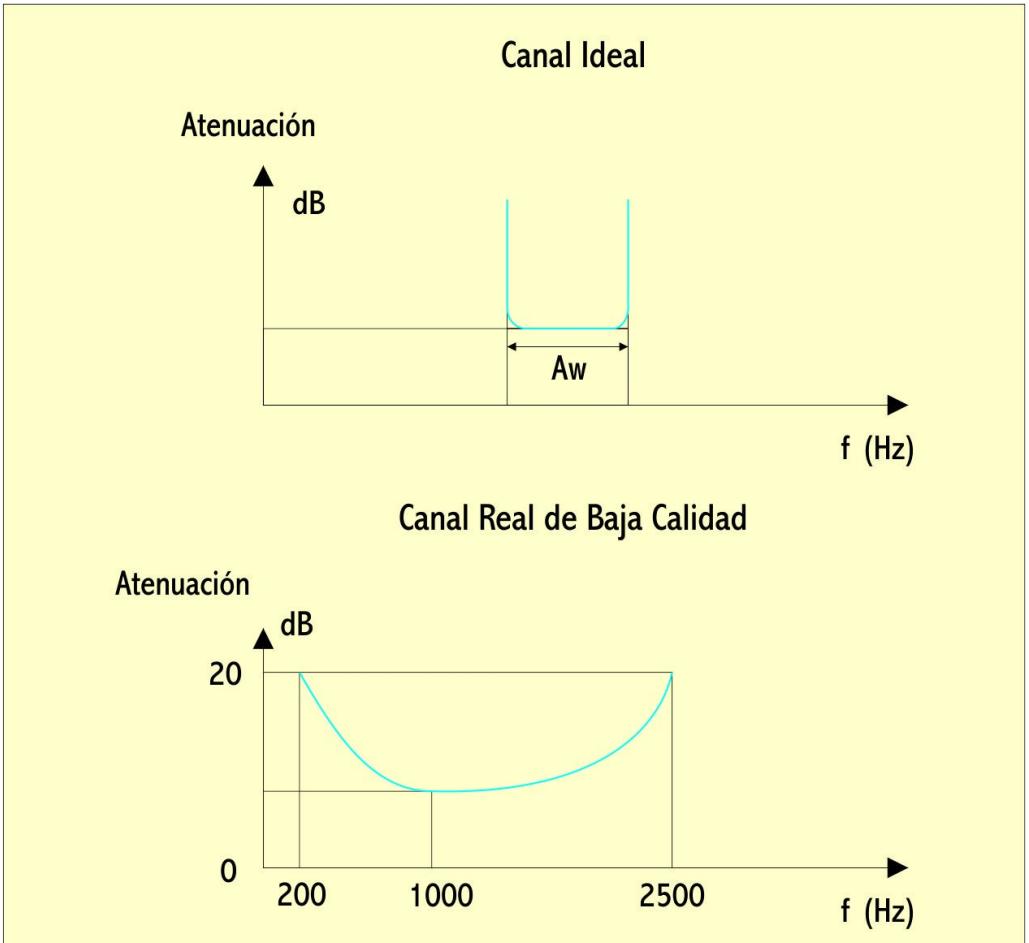
$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}$$

Reemplazando:

$$Z = R + j \left(2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC} \right)$$

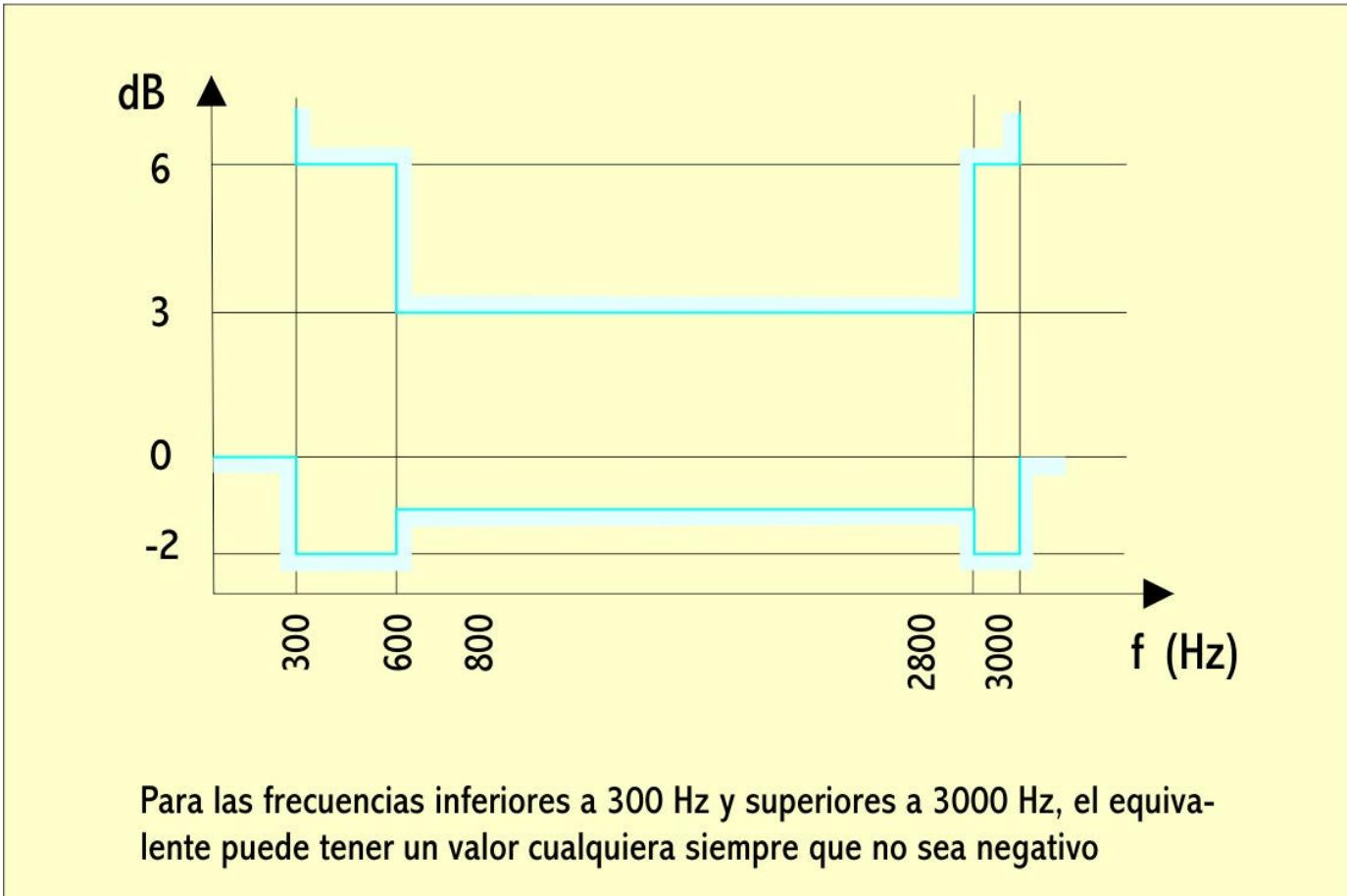


Características de la atenuación/frecuencia en canales vocales y reales.



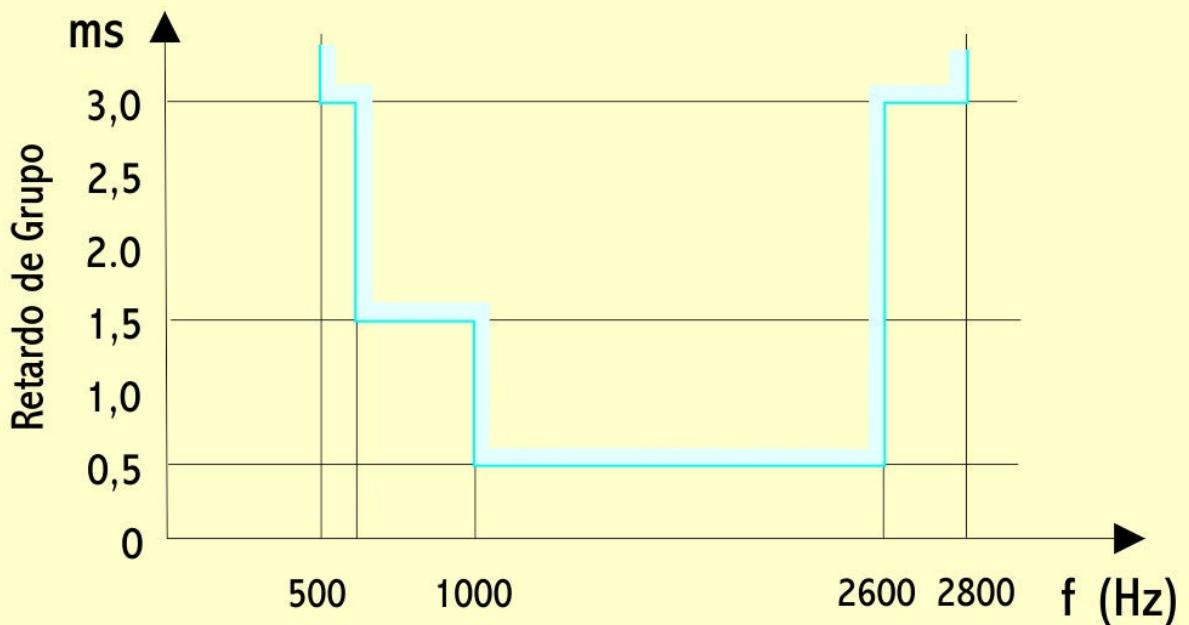


Recomendación M.1020: límites de distorsión por atenuación





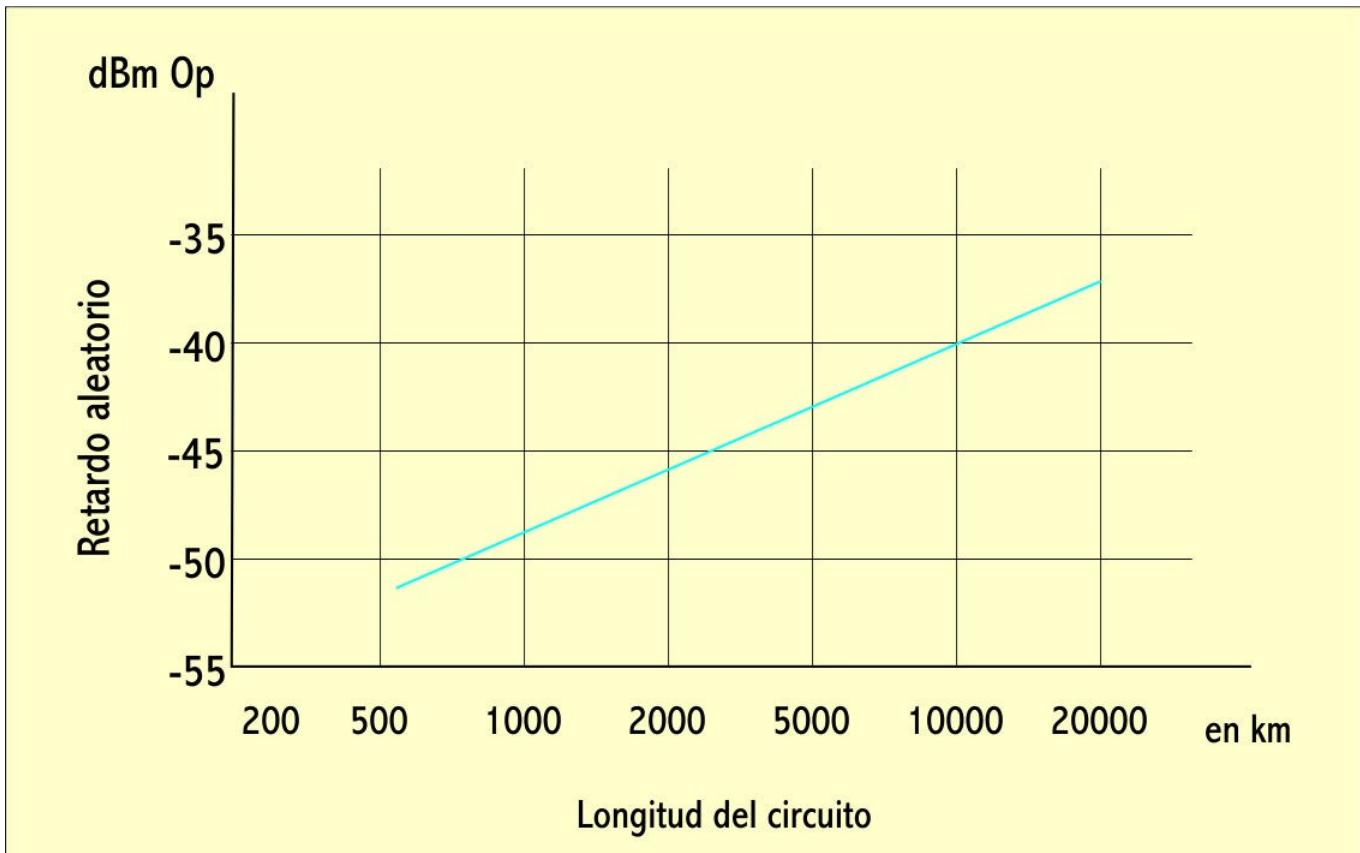
Recomendación M.1020: límites de distorsión por retardo de grupo



Límites del retardo de grupo, deben ser medidos con relación al retardo mínimo medido en la banda de 500 a 2800 Hz.



Recomendación M.1020: ruido aleatorio





A la *frecuencia de resonancia* la reactancia inductiva será igual a la reactancia capacitiva:

$$X_L = X_C$$

Luego: $Z = R$.

La frecuencia a la que se produce el efecto de resonancia resulta:

$$\bar{f}_r = \frac{1}{\sqrt{2\pi LC}}$$

A esa frecuencia el canal no tendrá efecto reactivo alguno.



3.9.3 Distorsión por retardo de grupo

Distorsión por retardo de grupo, o de fase, es la que se produce como consecuencia de que las distintas partes componentes de una señal se propagan en el canal a velocidades diferentes, y arriban al colector en un intervalo de tiempo distinto de cero.

La velocidad de propagación de las señales es función de la frecuencia.

Para cada frecuencia del intervalo habrá una velocidad diferente.



En las líneas que poseen características inductivas, las frecuencias más bajas viajan más rápido que las frecuencias más altas.

$$X_L = 2\pi fL$$

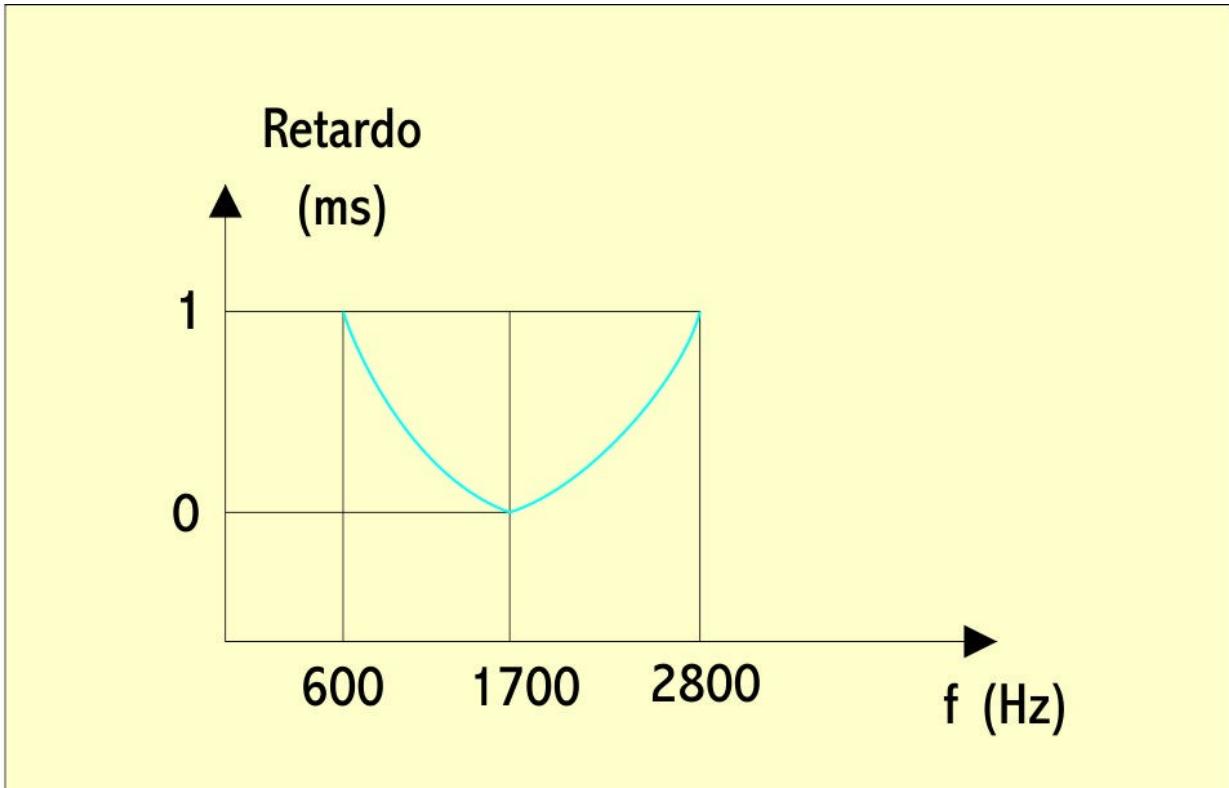
al revés de las líneas que poseen características capacitivas.

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC}$$



Distorsión de retardo de grupo en circuitos telefónicos

La dispersión
de la señal.



grupo



3.9.4 Distorsión por efectos meteorológicos(enlaces inalámbricos)

La distorsión por efectos meteorológicos se produce a causa de lluvias, nieve, tormentas de polvo u otras condiciones similares que afectan el medio de propagación y producen cambios bruscos en la señal.

Afecta en particular las bandas de:

- alta frecuencia (HF)
- muy alta (VHF)
- ultra alta frecuencia (UHF)



3.10 Errores en el proceso de transmisión de datos

3.10.1 Conceptos generales

3.10.1.1 Definición

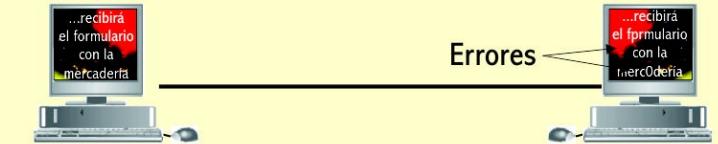
Error de transmisión es toda alteración o mutilación en un mensaje recibido, que no es réplica fiel del mensaje transmitido.

El contenido del mensaje puede ser inválido, o bien útil si se puede interpretar el contenido.



Transmisión de mensajes con errores

Mensaje con errores pero inteligible para el usuario



Terminal local

Terminal remota

Mensaje con errores que cambian el contenido del mismo

0100	0100000	010
N - 1	Byte N	N + 1

Bit que representa al
número 81 (hexadecimal)
transmitido

0100	0101001	1	010
N - 1	Byte N		N + 1

Errores: bytes que representan
al número 92 (hexadecimal)
recibido



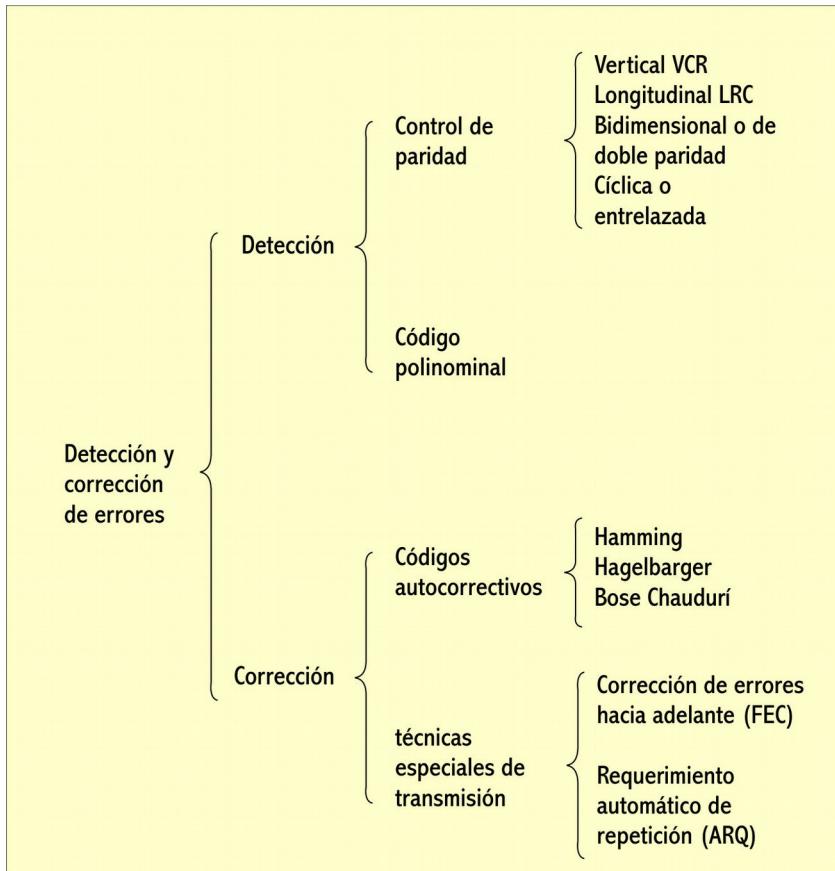
3.10.1.2 De operador a operador

La intervención de los operadores permite la detección y la corrección directa de los errores.

En funcionamiento automático la inteligencia del sistema detecta los errores, los acepta o rechaza de manera parcial o total.



3.10.1.3 De máquina a máquina: Métodos de detección y corrección de errores





3.10.2 Tipos de errores

Se pueden clasificar, según su distribución en el tiempo, en:

- Errores aislados o simples.

Afectan a un solo bit por vez; son independientes entre sí

- Errores en ráfagas.

Afectan a varios bits consecutivos, se presentan en períodos de tiempo indeterminados.

- Errores agrupados.

Se producen en tandas sucesivas de cierta duración, no afectan necesariamente a varios bits seguidos.



3.10.3 Tratamiento de los errores

Para disminuir, detectar y corregir errores de transmisión, se envían datos adicionales en el contenido del mensaje.

Cuanto mayor es la cantidad de bits adicionales que no llevan información:

- se logra una mayor protección contra errores
- disminuye la eficiencia del proceso de transmisión.

En la transmisión sincrónica existe el compromiso entre el tamaño de los bloques de cada mensaje y la eficiencia de la transmisión. Cuanto más pequeños sean los bloques:

- se hace menos probable la necesidad de retransmitirlos
- disminuye la eficiencia de la transmisión.



3.10.4 Detección de errores por métodos de control de paridad

3.10.4.1 Consideraciones generales

El control de errores implica:

- técnicas de diseño y fabricación de equipos
- metodologías para detectar y corregir errores.

Una metodología posible es *no tomarlos en cuenta*, por el tipo de información a transmitir y el uso que esta recibirá

Esto reduce los costos y aumenta el procesamiento total.



La detección de errores mediante el método de control de paridad se basa agregar otros bits de control adicionales en la secuencia de bits de información transmitidos.

Estos bits de control no transportan información alguna, sino que solo se utilizan para la verificación de la paridad de la secuencia de bits de datos.

Para la verificación de la paridad existen tres métodos posibles:

- Control de paridad vertical (VCR).
- Control de la paridad longitudinal, o bidimensional (LCR).
- Control de la paridad entrelazada o cíclica.



La paridad puede ser par o impar.

En la paridad par, si el número de unos de la palabra de información a transmitir es impar, el bit de control que se debe agregar será un uno, para que la suma total de ellos resulte un número par.

Si la paridad adoptada fuera impar, el bit de control que se debería agregar sería un cero, para que la suma total de ellos resulte un número impar.

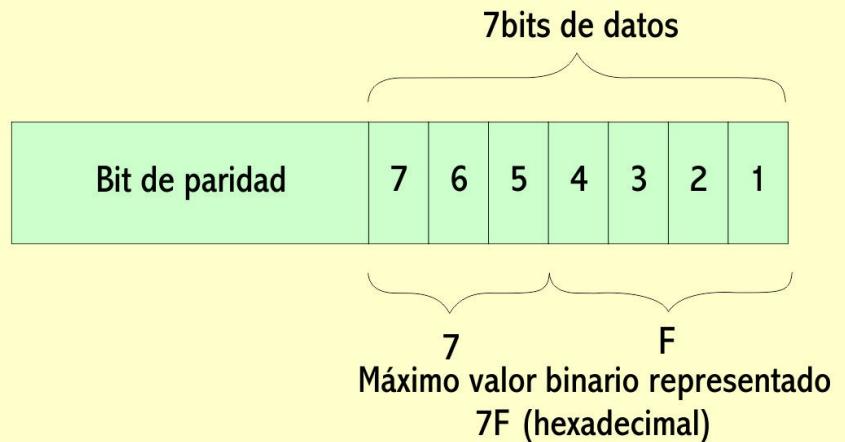
Paridad par será “0”, carácter resultante	0	01101101100
Paridad impar será “1”, carácter resultante	1	01101101100



3.10.4.2 Control de la paridad vertical

Control de la paridad vertical o VRC (*Vertical Redundancy Check*) se aplica a cada carácter o byte del código ASCII.

Se agrega un bit adicional al conjunto de 7 bits del carácter.



Ejemplo:

Dato transmitido	0	1	1	0	1	0	1
Para paridad “par” se agregaría un bit “0”	0	1	1	0	1	0	1
Para paridad “impar” se agregaría un bit “1”	0	1	1	0	1	0	1



3.10.4.3 Control de paridad longitudinal o bidimensional

Control de la paridad longitudinal o LRC (*Longitudinal Redundancy Check*) se aplica a un conjunto compuesto por bloques de N caracteres de 7 bits cada uno.

Ejemplo con $N = 5$.

- por cada carácter de 7 bits transmitidos, se agregó un bit de paridad vertical, que en este caso es par
- el carácter transmitido tendrá finalmente un total de 8 bits.



Carácter con doble inversión de bits.

Carácter transmitido con bit de paridad par

0	1101111
Paridad	Dato

Carácter recibido con doble inversión bit 5 y bit 7 (doble error)

0	1101010
Paridad	Dato

Ambos caracteres son recibidos con bit de paridad correcto



Ejemplo de control de paridad longitudinal.

	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Dato 4	Dato 5	
Bit N° 1	1	1	0	1	0	→ 1
Bit N° 2	1	1	0	1	1	→ 0
Bit N° 3	1	1	0	1	0	→ 1
Bit N° 4	0	0	0	0	1	→ 1
Bit N° 5	0	0	0	1	0	→ 1
Bit N° 6	1	0	1	1	1	→ 0
Bit N° 7	0	0	1	1	0	→ 0
Bit de paridad vertical	0	1	0	0	1	→ 0

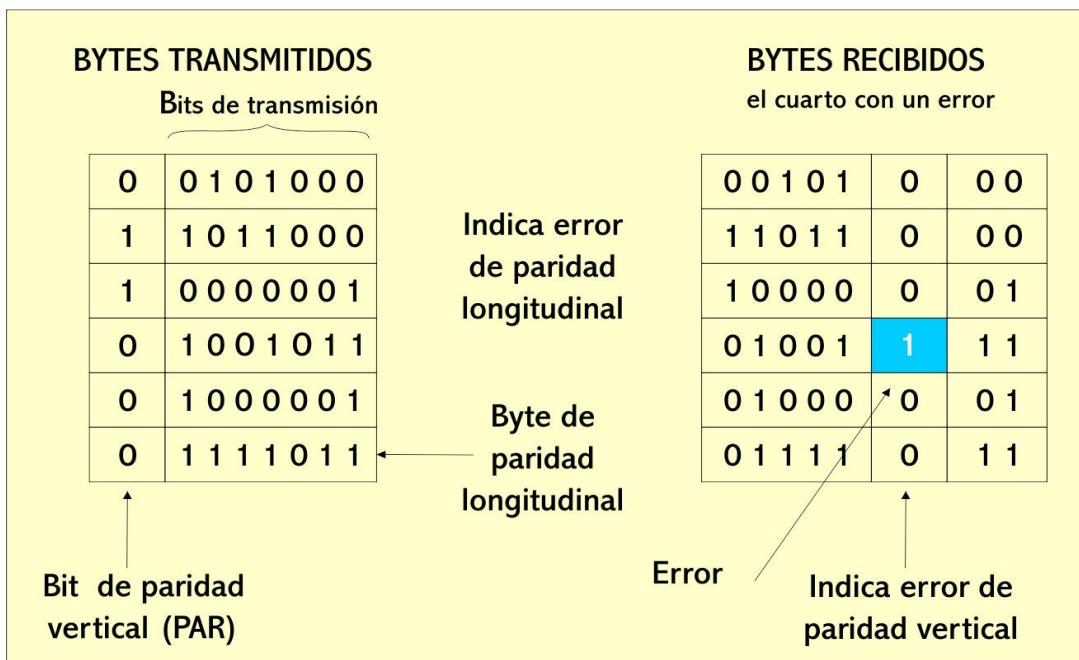
BCC



3.10.4.4 Control de paridad entrelazada o cíclica

Es un procedimiento que proporciona un nivel de detección de los errores de calidad:

- superior que la del método de la paridad vertical
- menor que la del método de la paridad longitudinal.

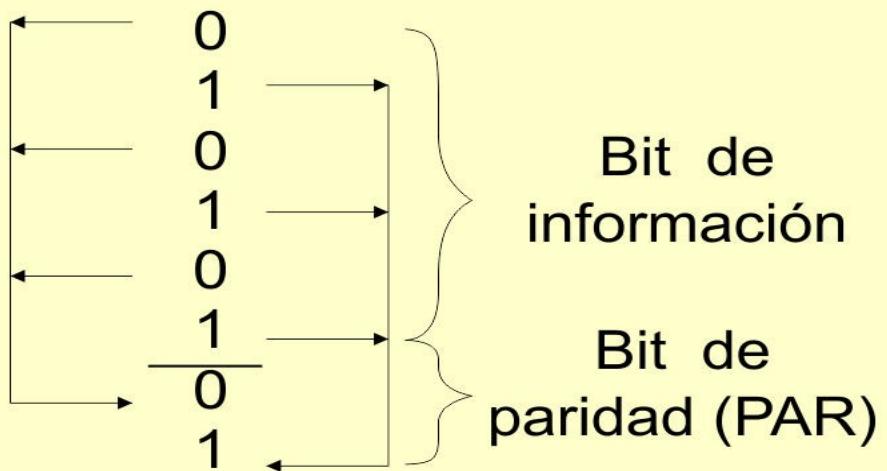




El primer bit de paridad proporciona la paridad de los bits primero, tercero y quinto, mientras que el segundo proporciona la paridad de los bits segundo, cuarto y sexto.

Carácter transmitido: 0 1 0 1 0 1

Generación de la paridad cíclica





3.10.5 Detección de errores por adición de información redundante

3.10.5.1 Conceptos generales

En redes de área extensa (WAN) o en las de área local (LAN) se adiciona al mensaje información redundante para determinar si se produjo un error.



Procedimiento:

- El nodo transmisor le aplica el algoritmo definido.
- Se genera la información redundante compuesta por k bits.
- El transmisor envía la información más los k bits redundantes.
- El receptor separa la información de los k bits redundantes.
- Aplica el algoritmo al contenido de la información.
- Si los bits redundantes coinciden con los calculados se acepta la información como válida.
- Si no hay coincidencia se rechaza.



3.10.5.2. Detección de errores por el método de suma de verificación (checksum)

Es una forma de control por redundancia muy simple

Se emplea en numerosos protocolos utilizados en redes de área extensa.

En Internet se usan en TCP/IP (*Transfer Control Protocol/Internet Protocol*).



Procedimiento:

En la fuente se suman los bytes adyacentes, o se ordenan de dos en dos formando palabras de 16 bits.

- con el resultado obtenido se calcula el complemento a 1.
 - el valor obtenido se coloca en el campo de bits de verificación.
- En el equipo colector se repite el cálculo de los bits de verificación.
- si ambos coinciden se considerará que la transmisión no tuvo errores.



3.9.5.3. Detección de errores por el método de control por redundancia cíclica (CRC)

Este método polinomial permite la verificación de todos los bits del mensaje mediante la utilización de un algoritmo matemático.

En el trasmisor divide el mensaje por un polinomio conocido en ambos extremos (generador).



No hay términos de acarreo para la suma, ni de préstamo para la resta (operaciones de **or exclusivo**).

Ejemplo de suma:

$$\begin{array}{r} 11101001 \\ + 10011100 \\ \hline 01110101 \end{array}$$

Ejemplo de resta:

$$\begin{array}{r} 11010001 \\ - 10010110 \\ \hline 01000111 \end{array}$$

Un mensaje 11011011 se asimila a un polinomio:

$$1.X^7 + 1.X^6 + 0.X^5 + 1.X^4 + 1.X^3 + 0.X^2 + 1.X^1 + 1$$



Procedimiento

- Definimos un polinomio $M(x)$ de grado n , a transmitir.
- Definimos un polinomio $G(x)$ de grado r (generador).
- Definimos un polinomio auxiliar del mismo grado que el generador de la forma Xr .
- Debe ser $n \gg r$.
- Se genera un polinomio que contenga $(r + n)$ bits, de la forma: $M(x) Xr$ ($M(x)$ es de grado n).
- Se divide el nuevo polinomio generado de la forma: $M(x) Xr$ por el polinomio generador $G(x)$ (empleando el álgebra de módulo 2).
- Se obtendrá un polinomio resto $R(x)$ (que siempre deberá tener un número de bits igual o menor que r , grado del polinomio resto).
- Se obtiene un polinomio $T(x)$, que es el polinomio a transmitir.



Se restan en módulo 2 los bits de $M(x)$ Xr y de $R(x)$

Paso 1º:

$$\frac{X^r M(x)}{G(x)} = C(x) + R(x)$$

Donde:

$C(x)$ es el cociente de la división (no tiene utilidad)

Paso 2º:

$$T(x) = X^r M(x) + R(x)$$



Paso 3º: $T(x)$ será siempre divisible por el polinomio generador $G(x)$.

Paso 4º: Si se introducen errores en la transmisión se recibirá:

$$T(X) = T(X) + E(X)$$



Polinomios generadores: están normalizados tres polinomios donde el término $(x + 1)$ está contenido como factor primo.

-**Polinomio CRC-16**

Se usa para caracteres codificados con 8 bits:

$$P(X) = X^{16} + X^{15} + X^2 + 1$$



- Polinomio UIT-T

El CCITT lo normalizó:

$$P(X) = X^{16} + X^{12} + X^5 + 1$$

Su rendimiento es igual al anterior.

- Polinomio CRC-12

Indicado para caracteres codificados con 6 bits.

$$P(X) = X^{12} + X^{11} + X^3 + X^2 + X^1 + 1$$



3.11 Corrección de errores

3.11.1 Consideraciones generales

En la mayoría de los sistemas la corrección de los errores no es imprescindible, puede pedirse retransmisión.

Dos estrategias:

- Corrección hacia atrás.
- Corrección hacia adelante.



3.11.2 Técnicas de corrección de errores

3.11.2.2 Corrección hacia atrás

Son los sistemas detectores de errores vistos antes.

Cuando el receptor detecta el error, solicita al transmisor la repetición.

Hay retransmisión de datos tantas veces hasta que se reciban libres de errores.



3.11.2.3 Corrección hacia adelante

Forward Error Control (FEC) usa códigos autocorrectores en el receptor.

Hacen innecesaria la retransmisión pero deben enviar mayor cantidad de bits que los necesarios usando códigos convencionales.



3.11.3 Corrección de errores mediante el uso de técnicas especiales de transmisión

3.11.3.1 *Retransmisión de los datos erróneos*

Se detectan errores y se pide la retransmisión inmediata.

Es la manera menos costosa y más sencilla.



3.11.3.2 Requerimiento automático de repetición

Automatic Retransmission Request (ARQ) solo se utiliza entre dos estaciones.

Control por medio del eco o *echo checking*.

Garantiza una transmisión de datos libre de errores.

Desventajas son:

- Solo entre dos estaciones al mismo tiempo.
- Es más lento que el FEC y será mucho más lento cuando aumenta el número de errores.
- El receptor debe poder transmitir, para acusar recibo y solicitar la retransmisión.



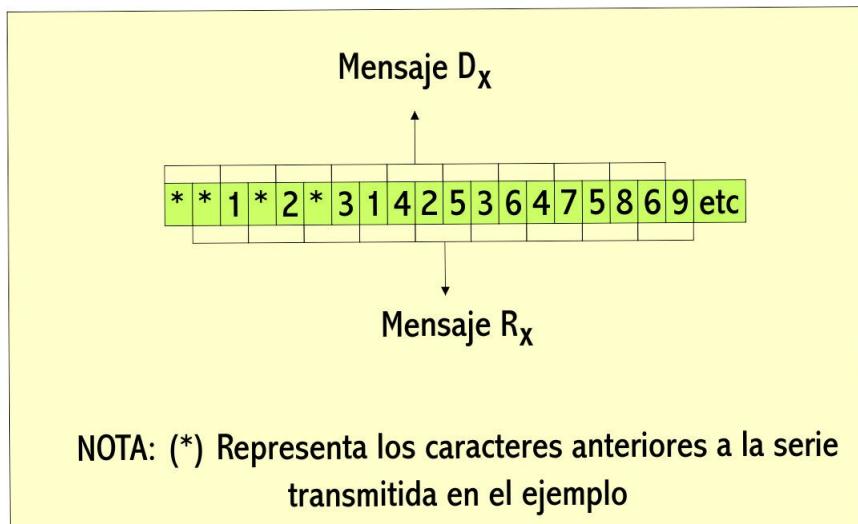
3.11.3.3 Corrección de errores hacia adelante

Forward Error Correction (FEC) se usa si hay más de una estación receptora y no se necesitan respuestas.

Funciona en división de tiempo (*time diversity*).

Cada mensaje se envía dos veces, intercalando los caracteres en diferentes instantes.

El receptor tiene dos oportunidades de recibir cada carácter en forma correcta.





Posibles operaciones del FEC.

OPERACIÓN DEL FEC		OPERACIÓN DEL FEC
Serir D _x	Serir R _x	
Sin error	Sin error	Se ordena imprimir el carácter
Con error	Sin error	Se ordena imprimir el carácter de la serie R _x
Sin error	Con error	Se ordena imprimir el carácter de la serie D _x
Con error	Con error	Se ordena imprimir el carácter especial que indica error en la recepción



3.11.4 Corrección de errores mediante el empleo de códigos autocorrectores

3.11.4.1 Introducción

Son códigos con suficiente redundancia para detectar y corregir errores sin pedir retransmisión.

La redundancia va desde unos pocos bits hasta llegar al doble o una cantidad mucho mayor de los necesarios para transmitir un carácter.



3.11.4.2 Distancia de Hamming

Es el número de bits en que difieren dos secuencias binarias $S1$ y $S2$ *de la misma longitud*.

Veamos en el alfabeto internacional Nº 5 de la UIT-T:

- la secuencia $S1$ (letra B)
- otras secuencias S_2 , S_3 , S_4 y S_5 , correspondientes a otras letras.

Si comparamos *bit a bit* de igual peso, la primera de las secuencias con las restantes, la distancia de Hamming estará dada por la cantidad de bits en que difieren uno a uno, los respectivos conjuntos.

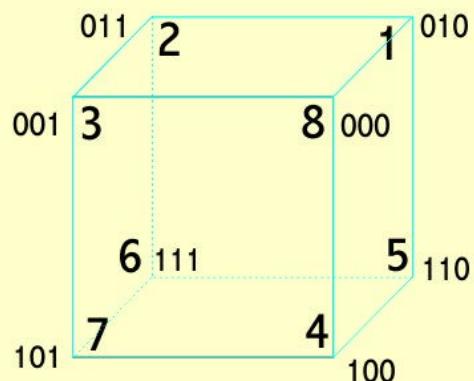


Distancias de Hamming tomadas para la secuencia correspondiente al símbolo “B”.

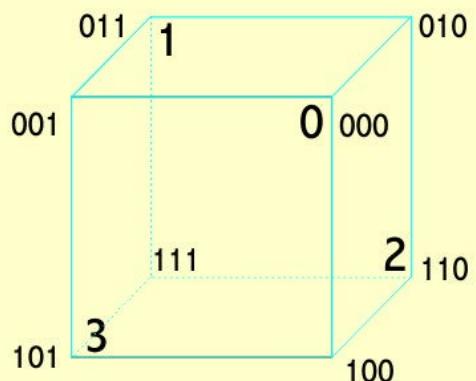
Conjunto	Representa	Secuencia binaria	Distancia de Hamming
S_1	B	0100001	---
S_2	C	1100001	1
S_3	D	0010001	2
S_4	E	1010001	3
S_5	U	1010101	4



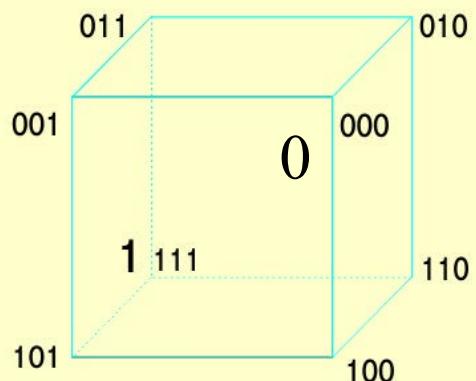
Para un código del tipo numérico, representamos los símbolos del alfabeto fuente usando una base octal:



8 Bytes



4 Bytes



2 Bytes



La capacidad de detección y corrección de errores es función del valor de H (distancia de Hamming):

Distancia de Hamming	Errores	
	Detección	Corrección
1	no	no
2	uno	no
3	dos	uno
4	tres	uno



3.11.4.3 Código de Hamming

Es un código autocorrector que permite detectar y corregir errores mediante el empleo de bits de paridad con determinadas combinaciones únicas de bits de información.

Ejemplo:

- para un carácter de 4 bits I_3, I_5, I_6 e I_7 de información
- intercalamos 3 bits de verificación de paridad P_1, P_2 y P_4 .



Bits de información			I ₃		I ₅	I ₆	I ₇
Bits de paridad	P ₁	P ₂		P ₄			
Caracter resultante	P ₁	P ₂	I ₃	P ₄	I ₅	I ₆	I ₇



Bits de información y paridad: relación entre ambos.

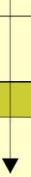
Bits de paridad	Bits de información		
P_1	I_3	I_5	I_7
P_2	I_3	I_6	I_7
P_4	I_5	I_6	I_7



Carácter original	I_3	I_5	I_6	I_7	0	0	1	1
Cálculo de bits de paridad (PAR)	Bits de información asociados						Bits de paridad (PAR)	
P_1	0	1	1					1
P_2	0	1	1					0
P_4	0	1	1					0
Código de Hamming formado	P_1	P_2	I_3	I_4	I_5	I_6	I_7	1
	1	0	0	0	0	1	1	



Bits de verificación indicadores de uno de paridad				Posición numérica del bit erróneo
	P ₄	P ₂	P ₁	
	0	0	0	Ninguno
	0	0	1	P ₁
	0	1	0	P ₂
	0	1	1	P ₃
	1	0	0	P ₄
	1	0	1	P ₅
	1	1	0	P ₆
	1	1	1	P ₇



Indica error de paridad en P4 y P2 debido a que el bit de información 16 recibido es incorrecto

Nota: Cada “1” de la tabla significa que el bit de paridad o verificación indica un error de paridad. No es el valor real del bit de verificación.



3.11.4.4 Código de Hagelbarger

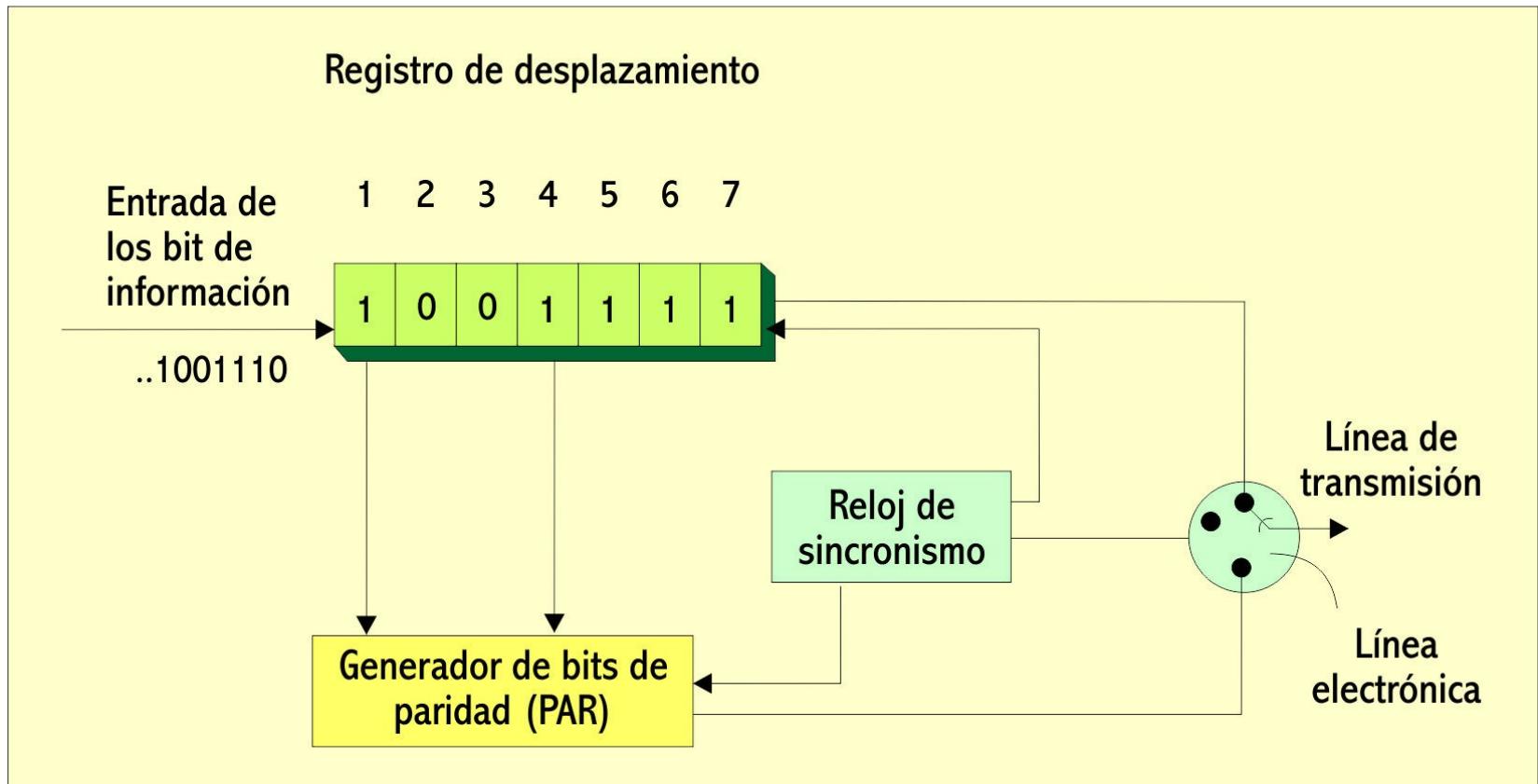
Permite corregir hasta 6 bits consecutivos (Hamming corrige solo un bit).

Hagelbarger exige que al grupo de errores le sucedan por lo menos 19 bits válidos antes de comenzar otra serie de bits erróneos.

El codificador Hagelbarger tiene un registro de desplazamiento serie.



Codificador Hagelberger.





3.11.4.5 Código de Bose-Chaudhuri

Tiene una distancia de $H = 5$

- puede detectar hasta cuatro errores
- puede corregir hasta dos bits.

Hay varias versiones del código.

La primitiva introduce 10 bits adicionales por cada 21 bits de información.



Para elegir un sistema debe considerarse:

- ¿Cuál es la tasa de error, tanto para las comunicaciones locales como para las remotas?
- ¿Cuáles serán los medios para recuperar la información afectada por errores?
- ¿Cuál es la cantidad de información a transmitir por unidad de tiempo; que se corresponde con el concepto definido como velocidad real de transferencia de datos?
- ¿Cuál es la velocidad de transmisión necesaria para satisfacer los requerimientos del sistema?



Sobre la base de ello, se deberá determinar:

- El ancho de banda del canal que será necesario usar.
- El tipo de control de errores que se requiere.
- Los medios de comunicaciones, y elementos técnicos, que podrán cumplir con esos requerimientos.