

Introducción a los sistemas de transmisión

Introducción a los sistemas de transmisión

Contenido

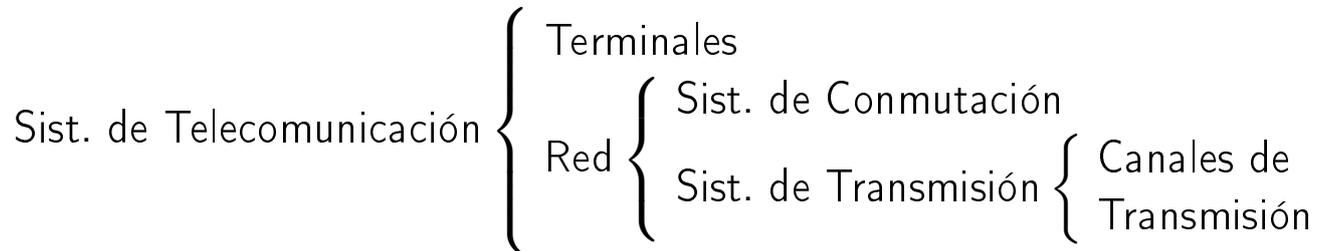
- Definiciones básicas y modelo de sistema de transmisión:
 - Sistema de telecomunicación.
 - Sistema de transmisión.
 - Señales.
- Clasificación de los sistemas de transmisión.
- Descripción de algunos sistemas de transmisión:
 - Telefonía de baja frecuencia.
 - Sistema MIC.
 - Difusión de TV digital.
- Normalización en los sistemas de transmisión.
- Unidades empleadas en los sistemas de transmisión:
 - Magnitudes y unidades.
 - Prefijos.
- Representación logarítmica:
 - dB; Np.
 - Niveles absolutos.
 - Niveles relativos.
- Adaptación de impedancias.
- Sistemas MDT:
 - PDH.
 - SDH.
- Apéndices.
- Problemas.

Sistema de telecomunicación

Los **sistemas de transmisión** constituyen una parte esencial de los **sistemas de telecomunicación** \implies Situemos ambos conceptos:

- **Telecomunicación:** Comunicación a distancia.
 - Edouard Estaunie (1904):
Intercambio de información por medio de señales eléctricas.
 - UIT (1932):
Toda comunicación telegráfica o telefónica de signos, señales, escritos, imágenes y sonidos de cualquier naturaleza por hilo, radio u otro sistema o proceso de señalización eléctrico o visual (hace referencia al antiguo telégrafo óptico, o semáforo, desarrollado por el francés Claude Chappe entre 1791 y 1793.)
 - UIT (Rec. UIT-T I.112):
Toda transmisión y/o emisión y recepción de señales que representan signos, escritura, imágenes y sonidos o información de cualquier naturaleza por hilo, radioelectricidad, medios ópticos u otros sistemas electromagnéticos.
- **Sistema de telecomunicación:** Conjunto de elementos que hacen posible la transferencia de información entre dos puntos distantes determinados.
 - En la actualidad se tiende a la integración con la informática dando lugar a las TIC, **Tecnologías de la Información y la [tele]Comunicación** (*Information and Communications Technologies* - ICT).

Partes del sistema de telecomunicación



Terminal: Equipo que proporciona las funciones necesarias para que el usuario pueda acceder a la red de telecomunicación.

Red de telecomunicación: Conjunto de **nodos** (*sist. de conmutación*) y **enlaces** (*sist. de transmisión*) que proporciona conexión entre dos o más puntos para facilitar la comunicación entre ellos.

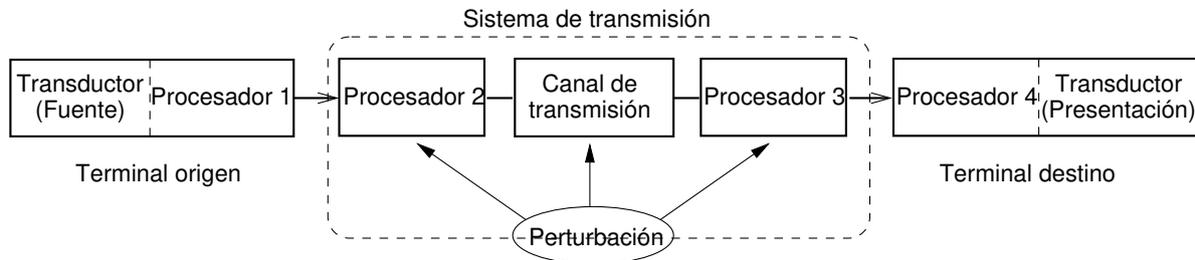
Sistema de conmutación: Subsistema de un sistema de telecomunicación con funciones de encaminamiento de la señal.

Sistema de transmisión: Subsistema de un sistema de telecomunicación con funciones de transporte de la señal.

- **Canal de transmisión:** Conjunto de equipos, medios de transmisión y asignaciones en el espacio, tiempo o frecuencia organizado para el transporte de una señal desde un punto de acceso a la red hasta otro emergente.
 - Un canal es *unidireccional*.
 - Un *circuito* es la unión de dos canales para ser *bidireccional*.

Modelo unidireccional de sistema de telecomunicación

Se estudia un modelo sin conmutación:



Elementos del **sistema de transmisión**:

- **Procesador (2,3)**: Adapta la señal al *canal* para aprovechar al máximo los recursos del sist. de transmisión y preservar la calidad de la señal (p.ej.: (2) multiplexor y (3) demultiplexor).
- **Canal de transmisión**: Conduce la señal hasta el terminal destino. Puede estar basado en conductor metálico (cable de pares y coaxial), dieléctrico (fibra óptica) o aéreo (tx. por radio).
- **Perturbación**: Degradación de la señal por fenómenos internos o externos al sistema de transmisión. Siempre presente, en mayor o menor medida.

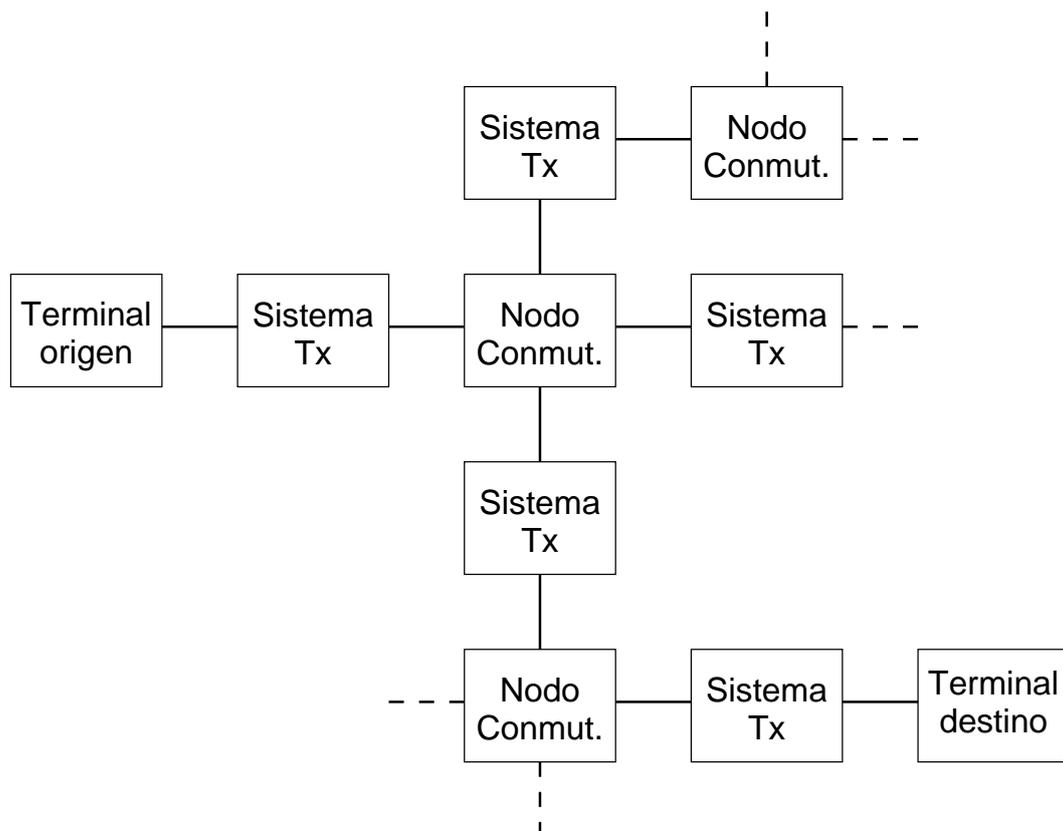
Otros elementos del **sistema de telecomunicación**:

- **Transductor (fuente)**: Convierte la información (arbitraria) en una señal electromagnética (p.ej.: cámara de TV).
- **Procesador (1,4)**: Adapta la señal al sistema de transmisión (p.ej.: conversor A/D en emisión y conversor D/A en recepción).
- **Transductor (presentación)**: Convierte la señal electromagnética en la información a presentar (p.ej.: pantalla LCD).
- **Terminales**: Conjuntos transductor+procesador que constituyen el origen y el destino de la información.

Ejemplo de sistema de telecomunicación

- El canal de transmisión puede incluir repetidores encargados de *amplificar* e incluso, en el caso de señales digitales, *regenerar* la señal transmitida, permitiendo largas distancias.
- El canal de transmisión no incluye los nodos encargados de las tareas de *encaminamiento*, ya que dichos elementos forman parte del sistema de conmutación.

Por tanto, un ejemplo completo de sistema de telecomunicación sería:



Señales (1)

La **información** se **transmite** en forma de **flujo de energía electromagnética**, que se **propaga** por los diferentes **medios** que componen el sistema de transmisión.

Esta **representación electromagnética de la información** que se propaga por el sistema de transmisión es lo que se conoce como **señal**.

Señal (Rec. UIT-T I.112): Fenómeno físico en el que una o más de sus características varían para representar algún tipo de información.

La UIT distingue **3** tipos de señales:

- **Señal analógica**: Señal en la que una de sus magnitudes características **sigue de manera continua** las variaciones de otra magnitud física que representa la información.
 - Se *caracteriza* por:
Potencia media, potencia de cresta, ancho de banda
 - Se *transmite* por:
 - Red analógica
 - Con conversión A/D → Red digital

Señales (2)

- **Señal discreta (en t):** Señal compuesta por una **sucesión temporal de muestras**, cada una de las cuales tiene una o más características que representan la información, por ejemplo, su duración, forma de onda, amplitud...
- **Señal digital: Señal discreta**, en la que la información se representa por un **número de valores discretos**, bien definidos, que una de sus magnitudes características puede tomar en función del tiempo.
 - Se *caracteriza* por:
 - Flujo continuo → Velocidad binaria (v_b en b/s)
 - Ráfagas → v_b media, v_b máxima
 - Se *transmite* por:
 - Red digital
 - Con conversión por módem¹ → Red analógica

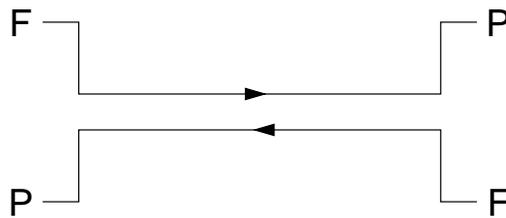
Sobre el medio de transmisión físico la diferencia entre la señal analógica y la digital no radica en la forma de la señal, **ambas con apariencia analógica**, sino en *cómo está codificada en ella la información*.

¹ Módem (MODulador-DEModulador): Dispositivo adaptador que prepara la señal digital para su transmisión por una red analógica y la reconstruye en la recepción.

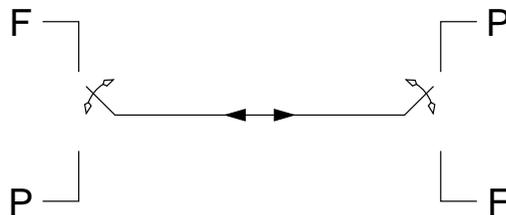
Clasificación de los sistemas de transmisión (1)

Según la direccionalidad:

Dúplex: Transmisión en ambos sentidos simultáneamente (telefonía).



Semidúplex: Transmisión en ambos sentidos, alternándolos en el tiempo (walkie-talkie, télex).



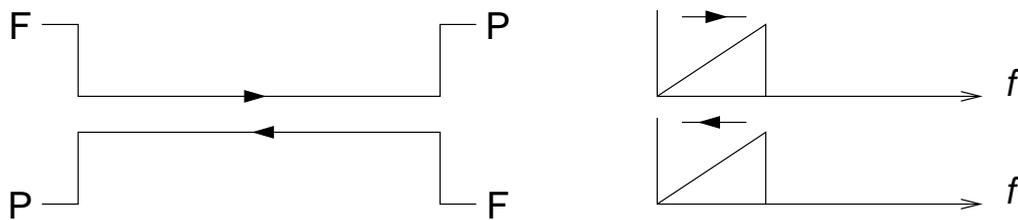
Símplex: Transmisión en un solo sentido: unidireccional (radiodifusión).



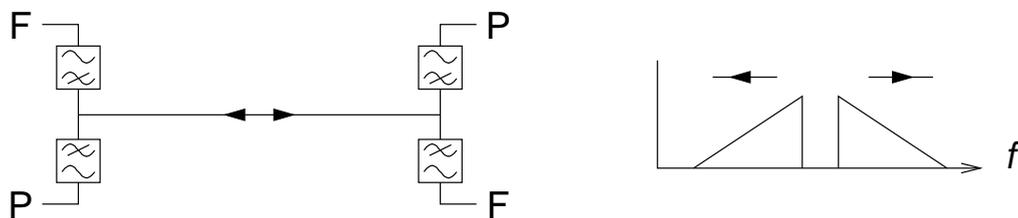
Clasificación de los sistemas de transmisión (2)

Según el modo de dar soporte a la bidireccionalidad:

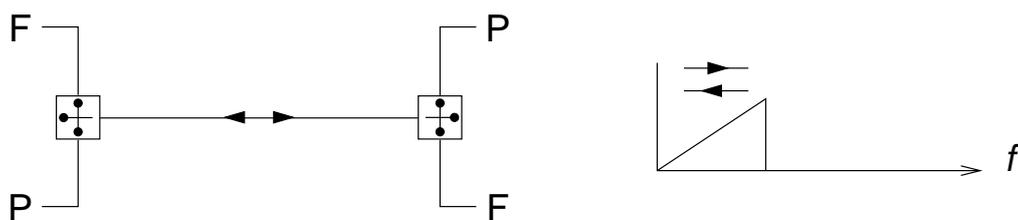
A cuatro hilos (4H): Hay caminos físicos distintos para cada sentido (distintos pares de hilos).



A cuatro hilos equivalentes: Ambos sentidos de transmisión por el mismo medio físico, pero sin solapamiento en el espectro.



A dos hilos (2H): Ambos sentidos de transmisión por el mismo medio físico (par de hilos) y ocupando el mismo rango de frecuencias.



Clasificación de los sistemas de transmisión (3)

Según la técnica transmisión:

Analógico: Inconvenientes:

- Distinto tratamiento a distinta información.
- Limitaciones debidas a:
 - Distorsión (amplitud, retardo).
 - Ruido.
 - Diafonía.
 - Variación del nivel.
- Transmisión de datos problemática.
- Control poco flexible.
- Número máximo de centros y medios de transmisión.
- Ajustes finos.
- ...

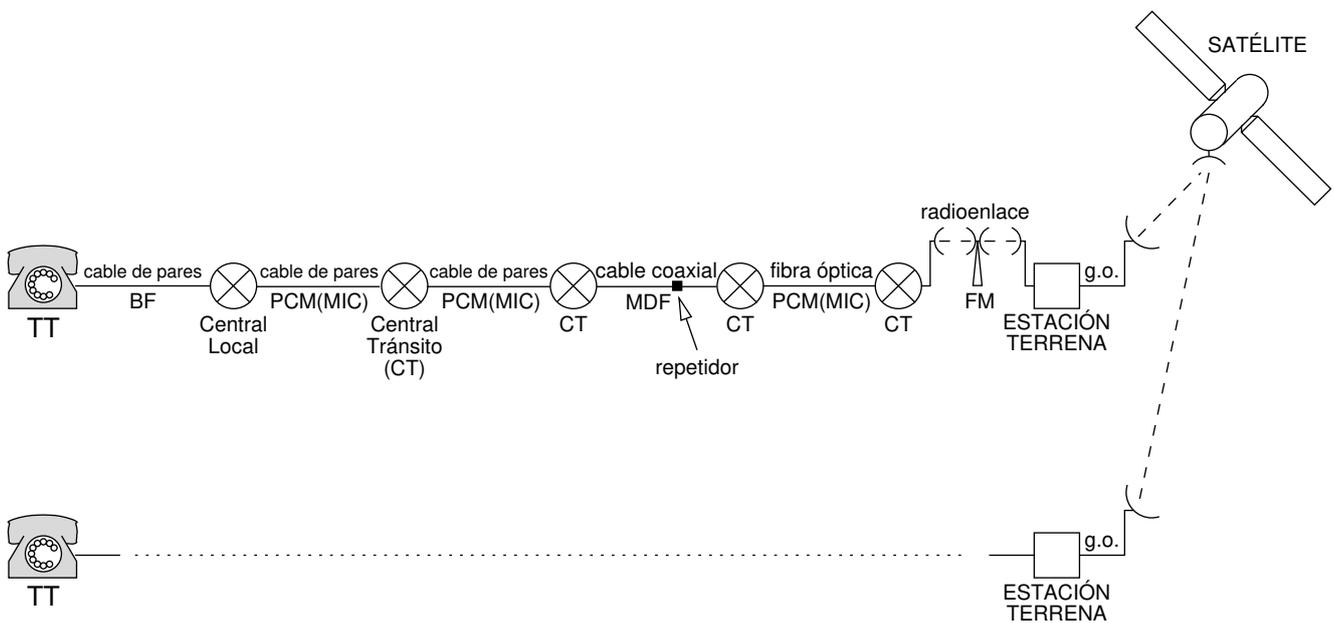
Digital: Ventajas:

- Independencia del origen de la información.
- No acumulación de degradación (regeneración).
- Flexibilidad en el control.
- Componentes de ordenadores (ahorro de espacio y dinero, integración de la conmutación, el control y la transmisión).
- Ajustes no complicados.
- ...
- \Rightarrow ahorro de dinero.

Descripción de algunos sistemas de transmisión

Ejemplo de constitución física de un canal telefónico internacional.

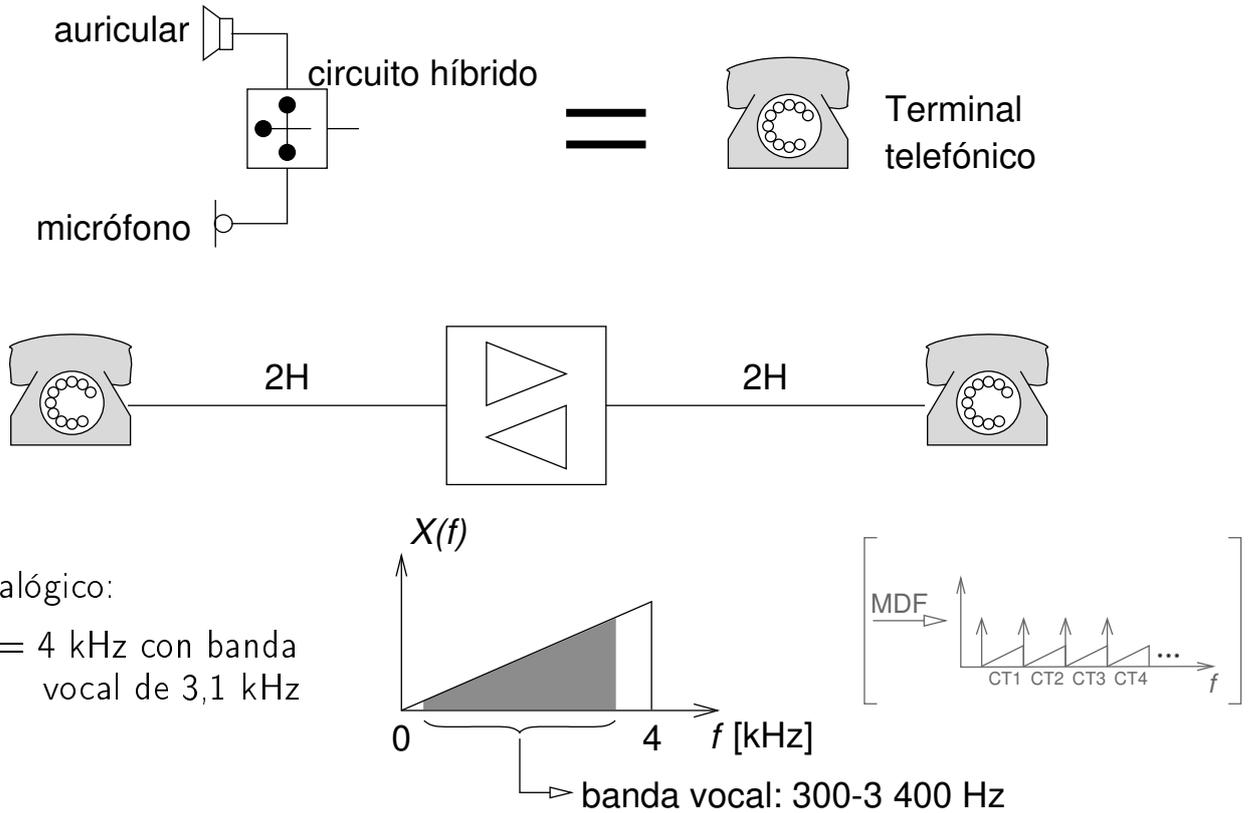
Aunque obsoleto, es interesante por mostrar un sistema de telecomunicación con un conjunto heterogéneo de sistemas de transmisión.



Sistema de telefonía de baja frecuencia (BF)

Sistema analógico de un canal telefónico (CT) a 2H:

- Muy sencillo por ser sin modulación.
- Base de la comunicación entre el abonado y su central local.



En analógico:

CT = 4 kHz con banda vocal de 3,1 kHz

Transductor de Fuente: Micrófono.

Transductor de Presentación: Auricular (teléfono).

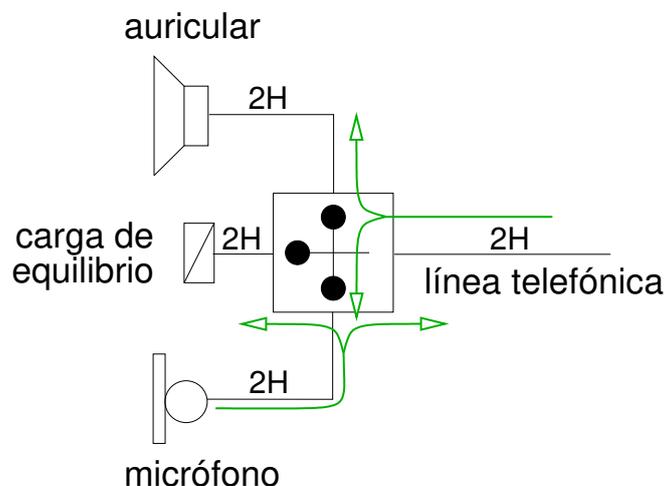
Procesador (o adaptador) en el terminal: Circuito híbrido (conversión 2H-4H).

Sistema de transmisión: Cable de pares. Puede tener amplificadores intermedios (sin amplificadores puede alcanzar 50–100 km).

Sistema: dúplex, 2H, analógico.

Circuito de conversación

- Realiza la conversión de 4 hilos (terminal) a 2 hilos (línea).
- Red lineal de cuatro puertas.



- Idealmente, la potencia que entra por una puerta se divide entre las dos puertas adyacentes, reduciéndose a la mitad en cada salida (pérdida de 3 dB).

Efecto local: Parte de la potencia generada en el micrófono pasa al auricular a través del circuito híbrido.

Aunque era el resultado de la imperfección del circuito híbrido resulta beneficioso \Rightarrow autorregulación del nivel de voz.

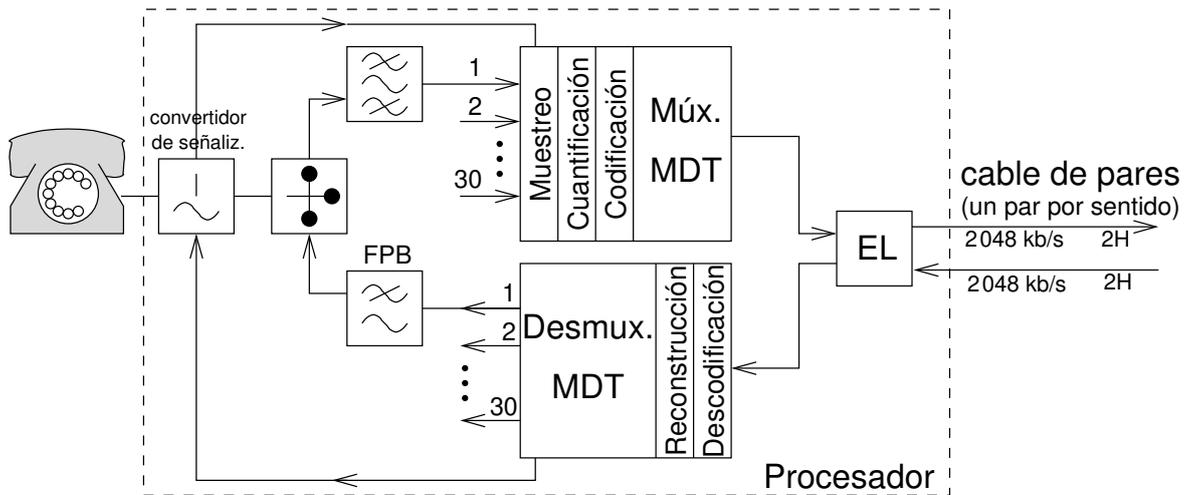
Así, el micrófono no entra en zona de alinealidad y además no se envía excesiva potencia a la línea.

Efecto local elevado \Rightarrow fatiga del oído y audición de ruidos ambientales.

Sistema MIC de 30 canales (1)

MIC = Modulación por Impulsos Codificados (*Pulse-Code Modulation - PCM*). Es la representación digital de señales analógicas muestreadas.

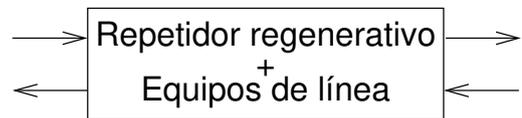
Sistema digital de 30 canales telefónicos (CT) a 4H para comunicación entre centrales.



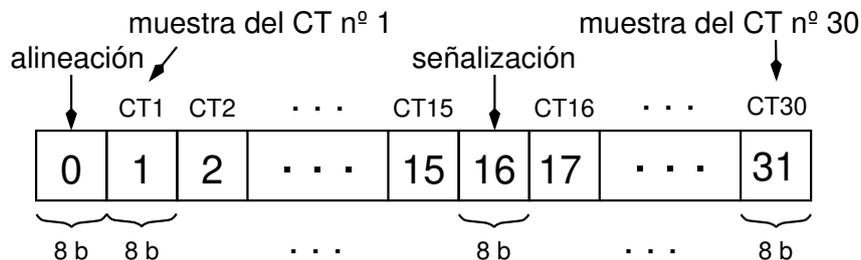
En digital:

$$CT = 64 \text{ kb/s}$$

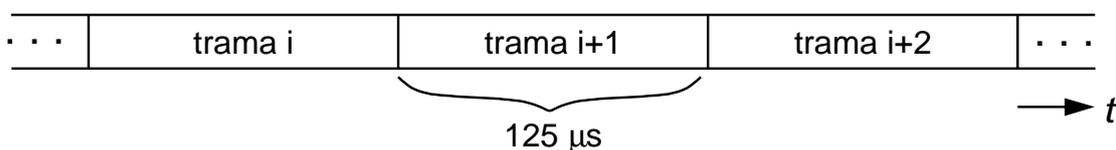
$$(8 \text{ kmuestra/s} \times 8 \text{ b/muestra})$$



Trama MIC (del múltiplex de 30+2 CT):



Flujo binario:



Sistema MIC de 30 canales (2)

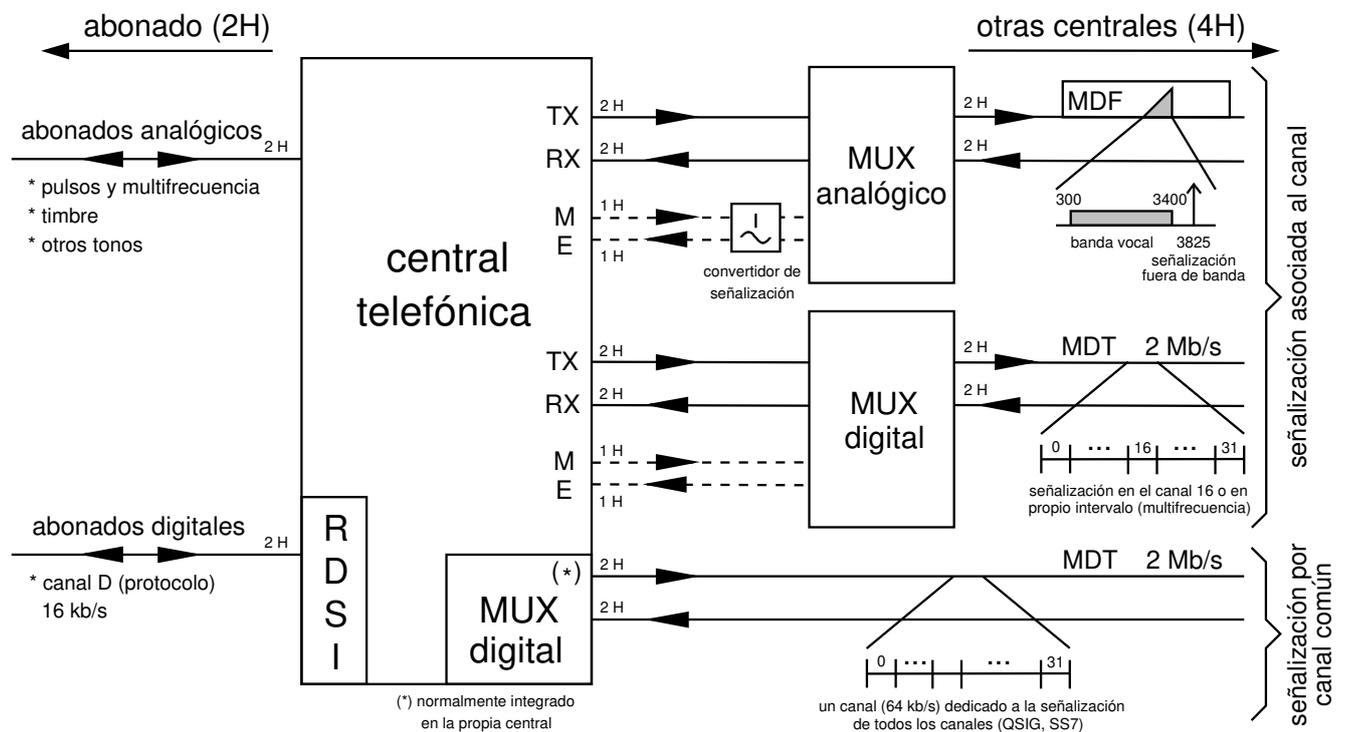
- Cada sentido de transmisión se cursa por un par de hilos distinto.
- La señal procedente del terminal telefónico se filtra y se muestrea (a 8 kHz) y multiplexa mediante MDT (Multiplexación por División en el Tiempo).
- Posteriormente se cuantifica con 256 niveles (8 b/muestra) y se le asigna una palabra código de longitud fija (8 b).
- La señal digital resultante se denomina **señal MIC (Modulación por Impulsos Codificados)**.
- La señal múltiplex digital está formada por repetición en el tiempo de la **trama MIC**, que consiste en 32 intervalos de 8 bits, 30 de los cuales transportan muestras, cada una de un canal.
- La **señalización** se codifica aparte y se transmite utilizando uno de los canales restantes.
- El **equipo de línea (EL)** convierte la señal a código de línea (p.ej. HDB3), adapta y protege el equipo.
- El sistema incluye **repetidores regeneradores** consistentes en un receptor digital más un transmisor digital que reproduce la señal digital con la amplitud adecuada.
- El filtro paso bajo (FPB) en recepción hace la función inversa al muestreo.
- $30+2 \text{ CT} \times 8 \text{ kHz} \times 8 \text{ b} = 2048 \text{ kb/s}$ ($8 \text{ kHz} \times 8 \text{ b} = 64 \text{ kb/s}$)

Sistema: dúplex, 4H, digital.

Señalización

Señalización = procedimiento mediante el que un usuario se comunica con la red de telecomunicación para prestación de servicios.

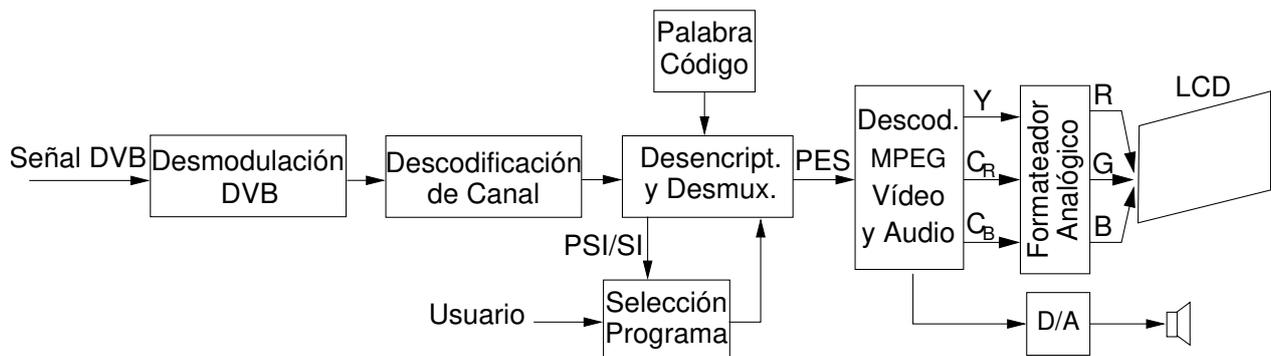
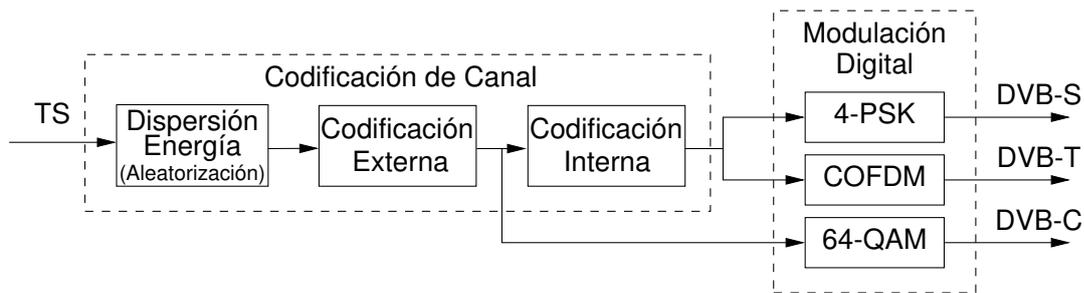
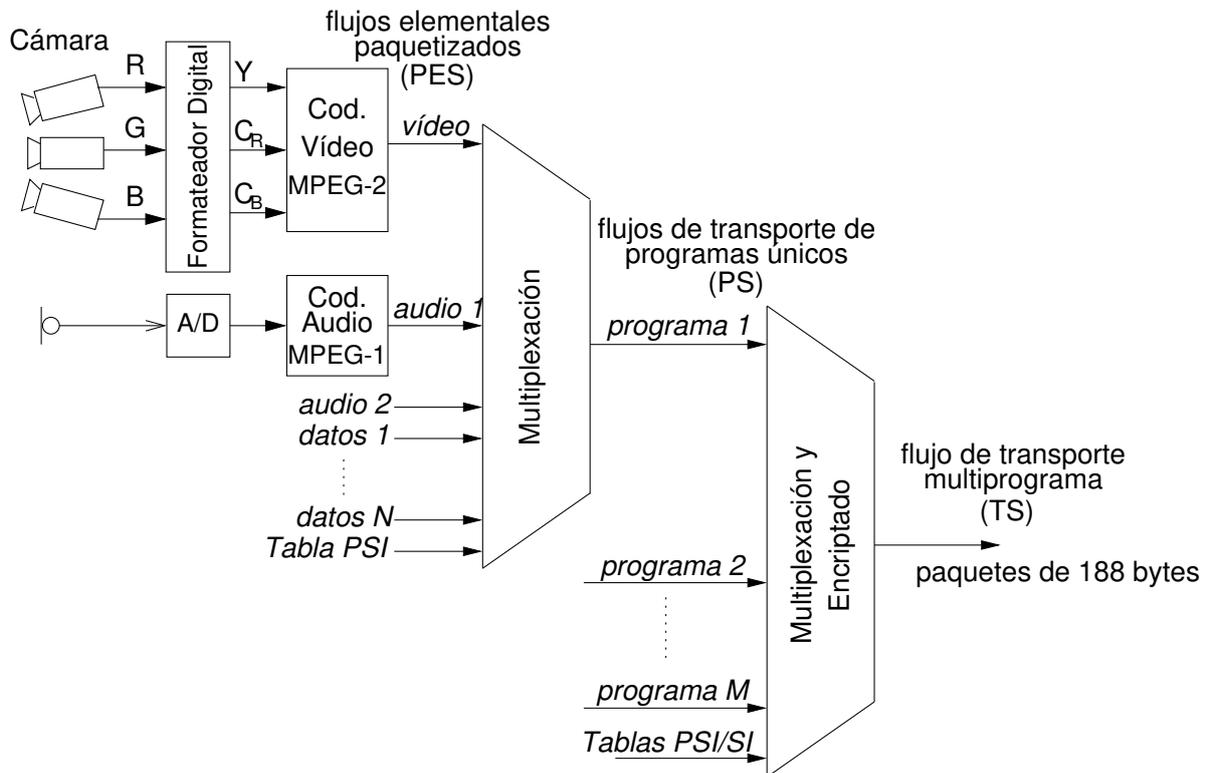
Ejemplo de red telefónica:



- Señalización hacia el abonado (enlace dedicado).
- Señalización entre centrales (enlace compartido).
 - Señalización asociada al canal.
 - Señalización por canal común.

Sistemas de difusión de TV digital (1)

Sistemas de radiodifusión terrestre (DVB-T) y por satélite (DVB-S).
 Sistema de difusión por cable (DVB-C).



Sistemas de difusión de TV digital (2)

- Transductor de Fuente: Cámara CCD. Tres señales a su salida, que representan la luminosidad correspondiente a cada color primario: rojo, verde y azul (*Red, Green, Blue* - RGB), en cada punto explorado.
- Transductor de Presentación: Pantalla LCD.
- Formateador digital: transforma linealmente, siguiendo la recomendación UIT-R BT.601, la señal de vídeo, captada en formato RGB, al formato $YC_R C_B$, que facilita tratar de distinta manera a luminancia (Y) y crominancias (C_R y C_B).
- Los flujos elementales (*Elementary Streams* - ES) de vídeo, audio o datos se paquetizan formando respectivos flujos elementales paquetizados (*Packetised Elementary Streams* - PES)
- Los PES de un único programa, y una de sus tablas PSI (*Program Specific Information*) se multiplexan para formar un programa. Esta tabla permite que se reconozcan, entre los paquetes multiplexados, aquellos que corresponden a los flujos de vídeo, audio o datos de ese programa.
- El segundo multiplexor combina varios programas (y opcionalmente encripta algunos de ellos) junto con otras tablas PSI y SI (*Service Information*) para producir un flujo de transporte (*Transport Stream* - TS) multiprograma, cuyos paquetes son siempre de 188 bytes. Las tablas PSI que se introducen permiten localizar en qué paquetes viaja la información de cada uno de los programas multiplexados (habitualmente entre cuatro y seis programas diferentes), así como cuáles están encriptados, incluyendo información particular de su encriptación. Las tablas SI permiten, además, conocer la localización de otros programas fuera de ese múltiplex específico, pero que también se ofrecen al usuario. Toda esta información permite la elaboración de las EPG (*Electronic Programming Guides*).

Sistemas de difusión de TV digital (3)

- La codificación de canal tiene siempre una codificación “externa” a la que se le puede añadir una etapa de codificación de canal “interna”:
 - Canal ruidoso (en radiodifusión): se añade.
 - Canal no muy ruidoso (en difusión por cable): no es necesaria.
- Tras la codificación de canal, cada TS multiprograma (con sus varios PES) es emitido sobre una portadora.
- En recepción, y gracias a las tablas PSI/SI, al usuario se le ofrecen los distintos programas de la red: no solo los que lleva el TS concreto que se está desmodulando, sino posiblemente también, gracias a las tablas SI, otros que viajan sobre portadoras distintas, pero que se ofrecen dentro de la misma red. Además, si algunos de ellos van encriptados, se extrae en el receptor la información particular del usuario para ver a cuáles tiene acceso antes de ofrecérselo. Una vez seleccionado por el usuario el programa de interés, si este se encuentra en el TS desmodulado, se extrae del programa correspondiente los flujos de vídeo y audio gracias a la tabla PSI, para después descodificarlos y, finalmente, presentarlos; si, en cambio, el programa seleccionado por el usuario se encuentra en otro TS, antes de hacer todo lo anterior se sintoniza la portadora correspondiente.

Sistema: símplex, 2H, digital.

Normalización de sistemas de transmisión

- Habitualmente, las administraciones de cada país constituyen organismos oficiales, de carácter nacional, encargados de dictar la **normativa** que deben cumplir los equipos de telecomunicación en general y, en particular, aquellos utilizados en los diferentes sistemas de transmisión del país.
- Dichos organismos oficiales nacionales se integran en otros, de carácter internacional, cuya misión consiste en la elaboración de **recomendaciones** y **reglamentos**, ambos de obligado cumplimiento, cuya misión es:
 - Facilitar la interconexión de equipos de distintos fabricantes.
 - Posibilitar el uso coordinado y eficaz del espectro radioeléctrico.a nivel **supranacional**.
- De entre los diferentes organismos existentes cabe destacar:
 - UIT
 - ISO
 - ETSI

Organismos de normalización (1)

UIT – Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU – *International Telecommunication Union*)

- Elabora "**recomendaciones**".
- Antiguos departamentos encargados de la normalización:
 - CCIR: Comité Consultivo Internacional de Radiocomunicaciones
 - CCITT: Comité Consultivo Internacional Telegráfico y Telefónico
- Nuevos departamentos encargados de la normalización desde 1993:
 - UIT-R: Sector de Radiocomunicaciones
Uso del espectro radioeléctrico.
 - UIT-T: Sector de Normalización de las Telecomunicaciones
Normalización de todo lo demás.

ISO – *International Organization for Standardization*

- Federación de organismos nacionales de normalización. El organismo español integrado es la Asociación Española de Normalización (UNE – Una Norma Española, hasta 2017 era AENOR).
- Cubre todos los sectores de la producción, salvo los campos eléctrico y electrónico (cubiertos por la IEC - *International Electrotechnical Commission*).
- En telecomunicación se trabaja conjuntamente con la UIT.

IEC – *International Electrotechnical Commission* (CEI – Comisión Electrotécnica Internacional)

- Elabora normas en el campo eléctrico, electrotécnico y de tecnologías afines.

Organismos de normalización (2)

ETSI – *European Telecommunications Standards Institute*

- Organismo reconocido por la UE como organización europea de normalización en las TIC.
- Elabora normas de obligado cumplimiento en la UE en temas de telecomunicación, difusión (broadcasting) y telemática, trabajando conjuntamente en los dos últimos temas con la EBU (*European Broadcasting Union*) y el CEN (*Comité Européen de Normalisation*).
- Sus normas también se usan fuera de la UE.

CENELEC – *Comité Européen de Normalisation Électrotechnique*

- Organismo reconocido por la UE como organización europea de normalización en materia electrotécnica.

Magnitudes y unidades

Unidades básicas del Sistema Internacional y sus derivadas (en telecomunicación) con nombre especial:

Magnitud	Unidad	Símbolo	Dimensión
Longitud	metro	m	
Masa	kilogramo	kg	
Tiempo	segundo	s	
Intensidad de corriente eléc.	amperio	A	
Temperatura termodinámica	kelvin	K	
Cantidad de sustancia	mol	mol	
Intensidad luminosa	candela	cd	
Ángulo plano	radián	rad	$m/m=1$
Ángulo sólido	estereorradián	sr	$m^2/m^2=1$
Frecuencia	hercio	Hz	s^{-1}
Fuerza	newton	N	$(kg \cdot m)/s^2$
Presión	pascal	Pa	N/m^2
Energía	julio	J	$N \cdot m$
Potencia	vatio	W	J/s
Carga eléctrica	culombio	C	$A \cdot s$
Tensión eléctrica	voltio	V	$J/C=W/A$
Capacitancia	faradio	F	C/V
Resistencia eléc. (Impedancia)	ohmio	Ω	V/A
Conductancia eléctrica	siemens	S	A/V
Flujo magnético	wéber	Wb	$V \cdot s$
Inducción magnética	tesla	T	Wb/m^2
Inductancia	henrio	H	Wb/A
Flujo luminoso	lumen	lm	$cd \cdot sr$
Iluminancia	lux	lx	lm/m^2
Temperatura	grado Celsius	$^{\circ}C$	$K (*)$

*) $0^{\circ}C = 273,15 K$

Prefijos de las unidades

Los prefijos del Sistema Internacional, de base 10, son:

Prefijo	Símbolo	Factor
Yotta	Y	10^{24}
Zetta	Z	10^{21}
Exa	E	10^{18}
Peta	P	10^{15}
Tera	T	10^{12}
Giga	G	10^9
Mega	M	10^6
kilo	k	10^3
hecto	h	10^2
deca	da	10^1
deci	d	10^{-1}
centi	c	10^{-2}
mili	m	10^{-3}
micro	μ	10^{-6}
nano	n	10^{-9}
pico	p	10^{-12}
femto	f	10^{-15}
atto	a	10^{-18}
zepto	z	10^{-21}
yocto	y	10^{-24}

En transmisión, kb/s, Mb/s y Gb/s $\equiv 10^3$, 10^6 y 10^9 b/s, respectivamente.

No confundir con los prefijos binarios (de base 2) que se usan normalmente para múltiplos del byte. Así:

- 1 kB (kilobyte = 10^3) \neq 1 KiB (kibibyte = $2^{10} = 1024$ bytes)
- 1 MB (megabyte = 10^6) \neq 1 MiB (Mebibyte = $2^{20} = 1024^2$ bytes)
- 1 GB (gigabyte = 10^9) \neq 1 GiB (Gibibyte = $2^{30} = 1024^3$ bytes)

Representación logarítmica de magnitudes (1)

Son comparaciones logarítmicas entre magnitudes del mismo tipo:

- Forma general: $A = k \log_n \frac{x_2}{x_1}$
 - n es la base: 10 o e .
 - k es el factor de proporcionalidad:
 - 10 o 20 (base 10).
 - 1/2 o 1 (base e).
 - x_1, x_2 son valores de la magnitud a medir:
 - dos puntos diferentes de un sistema.
 - si x_1 una referencia $\Rightarrow A$ se denomina **nivel**.
- Se representa la relación $\frac{x_2}{x_1}$:
 - \Rightarrow Son relativas.
 - \Rightarrow Son adimensionales.
- Adecuadas para expresar la pérdida de señal (amplitud o potencia) con la longitud recorrida en una línea de transmisión:
$$p(x) = p_o e^{-2\alpha x} \Leftrightarrow \ln p(x) = \ln p_o - 2\alpha x$$
- Prácticas para cantidades con gran rango dinámico.
- Convierten \times y \div en $+$ y $-$.
- Las respuestas de los órganos sensoriales son proporcionales a los logaritmos de las excitaciones.

Representación logarítmica de magnitudes (2)

Decibelio (dB)

Sirve para expresar la relación entre dos potencias mediante el logaritmo decimal de la relación \Rightarrow base $n = 10$:

$$A[\text{dB}] = 10 \log \frac{p_2}{p_1}$$

También sirve para expresar una relación entre dos magnitudes de campo (p.ej.: tensión, corriente, presión acústica, campo eléctrico, densidad de carga) **cuyo cuadrado es proporcional a una potencia** en los sistemas lineales:

$$\begin{aligned} A[\text{dB}] &= 10 \log \frac{p_2}{p_1} = 10 \log \frac{v_2^2/R_2}{v_1^2/R_1} = 20 \log \frac{v_2}{v_1} + 10 \log \frac{R_1}{R_2} \\ &= 10 \log \frac{i_2^2 R_2}{i_1^2 R_1} = 20 \log \frac{i_2}{i_1} + 10 \log \frac{R_2}{R_1} \end{aligned}$$

Asumiendo potencias disipadas sobre la misma impedancia resistiva:

$$\begin{aligned} A[\text{dB}] &= 10 \log \frac{p_2}{p_1} = 10 \log \frac{v_2^2/R}{v_1^2/R} = 20 \log \frac{v_2}{v_1} \\ &= 10 \log \frac{i_2^2 R}{i_1^2 R} = 20 \log \frac{i_2}{i_1} \end{aligned}$$

Cuidado, v e i son tensiones y corrientes **eficaces**.

Representación logarítmica de magnitudes (3)

Neperio (Np)

Sirve para expresar la relación entre dos magnitudes de campo (p.ej.: tensión, corriente), **cuyo cuadrado es proporcional a una potencia**, mediante el logaritmo neperiano de la relación \Rightarrow base $n = e$:

$$A [\text{Np}] = \ln \frac{v_2}{v_1}$$

Menos usada que el dB.

Pero aparece de forma natural al estudiar la *atenuación de propagación* en líneas de transmisión (tema 3):

$$v(x) = v_0 e^{-\alpha x} \Leftrightarrow \ln \frac{v(x)}{v_0} = -\alpha x$$

Suponiendo resistencias iguales:

$$A [\text{Np}] = \ln \frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{2} \ln \frac{p_2}{p_1}$$

Como:

$$\ln x = \frac{\log x}{\log e}$$

Se cumple:

$$20 \log \frac{v_2}{v_1} = \overbrace{20 \log e}^{8,68588963} \ln \frac{v_2}{v_1} = 8,7 \ln \frac{v_2}{v_1}$$

$$1 \text{ Np} = 8,686 \text{ dB}$$

$$1 \text{ dB} = 0,115 \text{ Np}$$

Niveles

Cuando x_1 es una referencia se habla del **nivel** L (*level*):

$$L = k \log \frac{x_2}{x_1}$$

x_2 = valor de una magnitud en un punto

x_1 = una referencia

Dos tipos de niveles:

Absolutos: x_1 es un valor de referencia de la magnitud.

P.ej.: 1 mW, 1 V.

Relativos: x_1 se corresponde con el valor de la magnitud en un **punto de referencia** del sistema.

Niveles absolutos (1)

$$L [\text{dBx}] = k \log \frac{x_2}{x_1}$$

donde el sufijo x representa la referencia x_1 .

P.ej.:

$$x_1 = 1 \text{ mW} \Leftrightarrow L = 10 \log \frac{p_2 [\text{mW}]}{1 \text{ mW}}$$

Las unidades de L son:

$$L [\text{dB}(1 \text{ mW})] = L [\text{dB}(\text{mW})] = L [\text{dBm}]$$

Algunos niveles absolutos frecuentes:

Magnitud	Referencia	Nivel absoluto	Expresión
Potencia	1 mW	L [dBm]	$10 \log p$ [mW]
Potencia	1 W	L [dBW]	$10 \log p$ [W]
Tensión	0,775 V	L [dBu]	$20 \log \frac{v [\text{V}]}{0,775 \text{ V}}$
Tensión	1 μV	L [dB μV] o [dBuV]	$20 \log v$ [μV]
Campo eléctrico	1 $\mu\text{V}/\text{m}$	L [dB μ] o [dBu]	$20 \log E$ [$\mu\text{V}/\text{m}$]
Intensidad sonora	$10^{-12} \text{ W}/\text{m}^2$	L_I [dB]	$10 \log \frac{I [\text{W}/\text{m}^2]}{10^{-12} \text{ W}/\text{m}^2}$
Presión acústica	$2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$	L_P [dB] o [dBspl]	$20 \log \frac{P [\text{Pa}]}{2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}}$

Paso de unidades naturales a logarítmicas y viceversa:¹

$$P[\text{dBm}] = 10 \log p[\text{mW}] \Rightarrow p[\text{mW}] = 10^{P[\text{dBm}]/10}$$

¹ Se suele usar letras minúsculas para representar variables en unidades naturales, y mayúsculas para variables en unidades logarítmicas.

Niveles absolutos (2)

En telefonía, la impedancia de referencia habitual es $R = 600 \Omega$.

$$\text{Si } p = 1 \text{ mW} \rightarrow 10^{-3} \text{ W} = \frac{v^2}{600} \Rightarrow v = 0,775 \text{ V (tensión eficaz):}$$

$$\Rightarrow L [\text{dBm}] = 10 \log \frac{v^2/600}{0,775^2/600} = 20 \log \frac{v}{0,775} = L [\text{dBu}]$$

\Rightarrow Trabajando con 600Ω , el nivel en dBm **coincide numéricamente** con el nivel en dBu \Rightarrow se pueden medir niveles con el voltímetro en lugar del watímetro, sin abrir el circuito.

Si la impedancia en cuyos extremos se mide la tensión es $R [\Omega]$:

$$\Rightarrow L [\text{dBm}] = 10 \log \frac{v^2/R}{0,775^2/600} = 20 \log \frac{v}{0,775} + 10 \log \frac{600}{R}$$

$$\Rightarrow L [\text{dBm}] = L [\text{dBu}] + 10 \log \frac{600}{R}$$

Ejemplo: Si el voltímetro marca -13 dBu :

$$R = 600 \Omega \Rightarrow L [\text{dBm}] = -13 [\text{dBu}] + 0 [\text{dB}] = -13 \text{ dBm}$$

$$\Rightarrow p [\text{mW}] = 10^{-13/10} = 0,05 \text{ mW}$$

$$R = 150 \Omega \Rightarrow L [\text{dBm}] = -13 [\text{dBu}] + 6 [\text{dB}]^1 = -7 \text{ dBm}$$

$$\Rightarrow p [\text{mW}] = 10^{-7/10} = 0,20 \text{ mW}$$

¹ Se suele aproximar: $10 \log 2 = 3,0103 \approx 3 \text{ dB}$ y $10 \log 4 = 6,0206 \approx 6 \text{ dB}$.

Niveles relativos (1)

$$L [\text{dBr}] = k \log \frac{x_2}{x_1}$$

x_2 = valor de la magnitud en un punto del sistema

x_1 = valor de la magnitud en el punto del sistema que se toma como **referencia (punto ficticio de referencia)**.

Para potencias:

$$L [\text{dBr}] = 10 \log \frac{p_2}{p_1}$$

En realidad se mide la ganancia entre el punto ficticio de referencia y el punto en cuestión para una **señal de prueba** sinusoidal a la frecuencia de referencia.

Para la señal de prueba y en el punto ficticio de referencia el nivel relativo es 0 dBr.

⇒ Se llama punto de 0 dBr o **punto de nivel relativo cero (PNR0)**.

Niveles relativos (2)

Según la Rec. UIT-T G.101, la atenuación en los sistemas de transmisión analógicos se determina utilizando **tonos de prueba**, que cumplen las características siguientes:

- Frecuencia: 1020 Hz (Rec. UIT-T O.6).
- Nivel de potencia conocido, e igual a **0 dBm**, en un punto concreto y prefijado de todo el sistema de transmisión (PNR0).

El nivel de potencia de cualquier señal en el PNR0 se suele indicar añadiendo el sufijo **0** a las unidades. Por tanto, el nivel de potencia (en dBm) en el PNR0 se especificará como **L dBm0**.

El nivel del tono de prueba en el PNR0 es de **0 dBm0**.

El PNR0 no es accesible (es un punto puramente **ficticio**) situado en un lugar concreto del circuito.

Su posición se suele fijar siguiendo determinados criterios prácticos.

La aplicación más importante del PNR0 es la utilización de **niveles relativos** para caracterizar el sistema de transmisión para la frecuencia analizada.

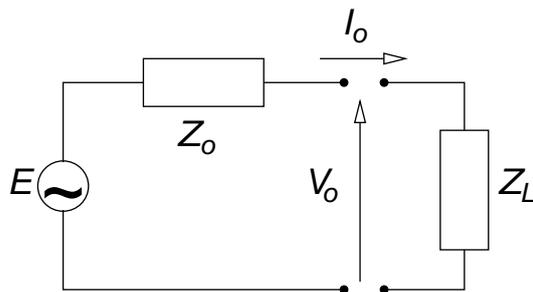
Una señal, a la frecuencia de referencia, de L_o dBm0 presentará:

- un nivel absoluto de potencia de L_o dBm en el punto de 0 dBr.
- un nivel de $(L_o + x)$ dBm en un punto del sistema de x dBr.
- La variación del nivel relativo L_r dBr indica el **perfil** del circuito, y lo caracteriza completamente (a la frecuencia analizada):

$$L [\text{dBm}] = L_o [\text{dBm0}] + L_r [\text{dBr}]$$

Adaptación de impedancias en un circuito

El análisis de la transferencia de potencia a una carga se puede resolver para el régimen estacionario con el circuito resultante del equivalente de Thévenin:



$$I_o = \frac{E}{Z_o + Z_L}$$

$$V_o = I_o Z_L = E \frac{Z_L}{Z_o + Z_L}$$

donde E , I_o , V_o , Z_o y Z_L son valores complejos. P. ej.:

$$Z_o = |Z_o| e^{j\varphi_{Z_o}} = |Z_o|(\cos \varphi_{Z_o} + j \operatorname{sen} \varphi_{Z_o}) = R_o + jX_o$$

Se definen distintos valores de potencia en la carga:

- Potencia vectorial

$$\bar{P} = V_o I_o^*$$

- Potencia **aparente** (V_o y I_o se miden por separado sin sus fases)

$$P = |V_o I_o^*| = |V_o| |I_o| = |I_o|^2 |Z_L| = |V_o|^2 / |Z_L|$$

- Potencia **media** (potencia activa, potencia disipada)

$$P_m = \operatorname{Re} [V_o I_o^*] = \operatorname{Re} \left[|V_o| e^{j\varphi_{V_o}} |I_o^*| e^{-j\varphi_{I_o}} \right] =$$

$$= |V_o I_o^*| \cos(\varphi_{V_o} - \varphi_{I_o}) = P \cos(\varphi_{V_o} - \varphi_{I_o}) = P \cos(\varphi_{Z_L})$$

Adaptación conjugada

Si se desea maximizar la transferencia de potencia, se ha de considerar una carga que verifique $\frac{\partial P_m}{\partial |Z_L|} = 0$ y $\frac{\partial P_m}{\partial \varphi_{Z_L}} = 0$ obteniéndose $Z_L = Z_o^*$, denominada **adaptación conjugada** (el generador ve en conjunto una impedancia resistiva pura).

La potencia entregada es

$$P_m = \operatorname{Re} \left[\frac{E Z_L}{Z_o + Z_L} \frac{E^*}{Z_o^* + Z_L^*} \right] = \frac{|E|^2 \operatorname{Re} [Z_L]}{|Z_o + Z_L|^2} \stackrel{Z_L=Z_o^*}{=} \frac{|E|^2 R_o}{4R_o^2} = \frac{|E|^2}{4R_o} = P_d$$

denominada **potencia disponible** P_d .

Sin embargo, la relación entre V_o y E resulta ser

$$\frac{V_o}{E} = \frac{Z_L}{Z_o + Z_L} \stackrel{Z_L=Z_o^*}{=} \frac{Z_o^*}{2R_o}$$

que no tiene por qué ser un número real por lo que, en general, podrá haber distorsión en la señal transferida (la parte imaginaria de Z_o varía con la frecuencia).

Adaptación imagen

A diferencia del caso anterior, los sistemas de telecomunicación priman la transferencia de señal sin distorsión, situación que se puede conseguir con $Z_L = Z_o$, denominada **adaptación imagen**.

Ahora la relación entre V_o y E es

$$\frac{V_o}{E} = \frac{Z_L}{Z_o + Z_L} \stackrel{Z_L=Z_o}{\downarrow} = \frac{Z_o}{2Z_o} = \frac{1}{2}$$

La potencia entregada es

$$P_m = \operatorname{Re} \left[\frac{E Z_L}{Z_o + Z_L} \frac{E^*}{Z_o^* + Z_L^*} \right] = \frac{|E|^2 \operatorname{Re} [Z_L]}{|Z_o + Z_L|^2} \stackrel{Z_L=Z_o}{\downarrow} = \frac{|E|^2 R_o}{4|Z_o|^2}$$

que solamente es igual a la potencia disponible $P_d = \frac{|E|^2}{4R_o}$ cuando la carga es real, es decir $Z_L = Z_o = R_o$, y por tanto la adaptación imagen es igual a la adaptación conjugada.

En transmisión, al hablar de un sistema adaptado nos referimos a adaptación imagen.

Desadaptación

La desadaptación de la carga causará una reflexión.

Para caracterizar los sistemas en los que la impedancia de la carga Z_L es distinta del valor correspondiente a la adaptación imagen, es decir $Z_L \neq Z_o$, se define el **coeficiente de reflexión** de tensión:

$$r = \frac{Z_L - Z_o}{Z_L + Z_o} \quad (0 \leq |r| \leq 1, \text{ si el desfase entre } Z_L \text{ y } Z_o \text{ es } < 90^\circ)$$

que, expresado como la atenuación de la señal reflejada con respecto a la incidente, se denomina **atenuación de retorno** o **pérdidas de retorno**:

$$A_r [\text{dB}] = -20 \log |r| \quad 0 \leq A_r [\text{dB}] \leq \infty,$$

y que, expresado como la atenuación de la señal transmitida a la carga con respecto a la incidente, se denomina **pérdidas por reflexión**:

$$R [\text{dB}] = -10 \log |1 - r^2| = 20 \log \left| \frac{Z_L + Z_o}{2\sqrt{Z_L Z_o}} \right|$$

Sistemas MDT para el transporte de señales

Objetivo:

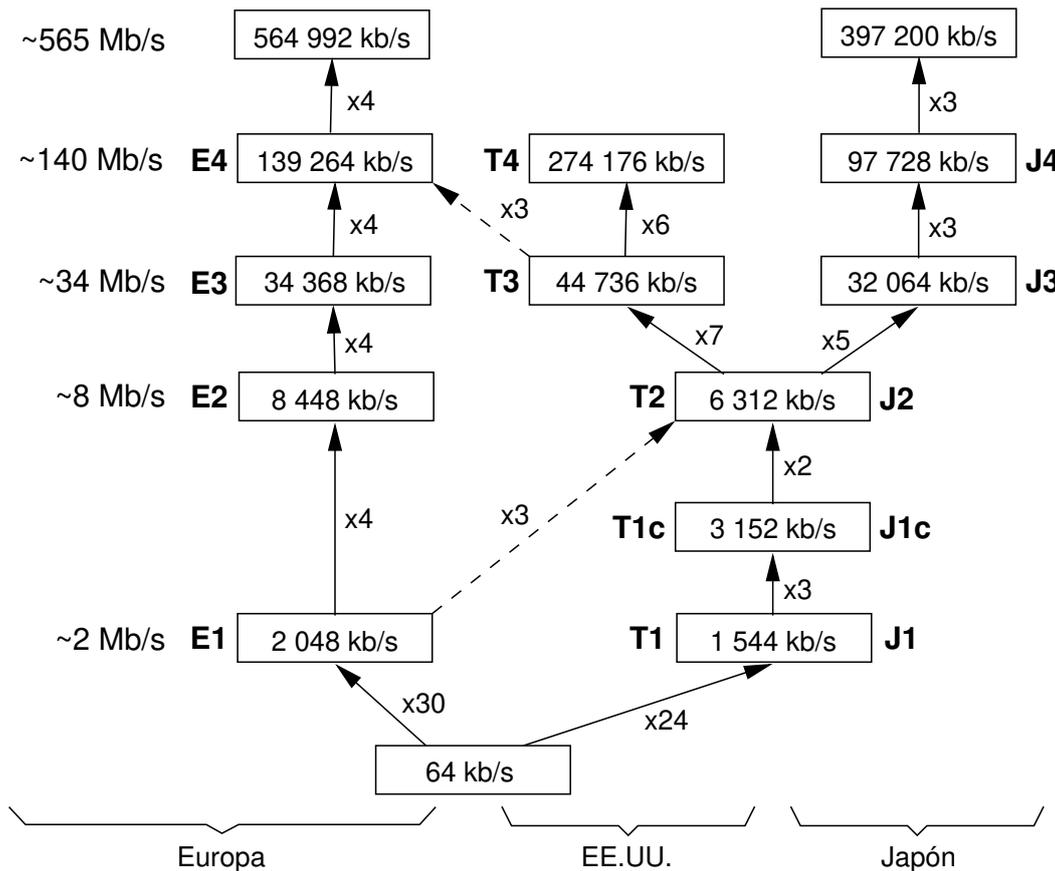
Transportar conjuntamente todo tipo de señales.

Familias:

- PDH (*Plesiochronous Digital Hierarchy*)
Jerarquía Digital Plesiócrona (antigua).
- SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*)
Jerarquía Digital Síncrona (actual).

PDH (1)

Se creó para el transporte de señales vocales aunque en la actualidad, mediante un proceso adicional, se puede transportar otro tipo de señales (tráfico IP).



Se van añadiendo bits extra (sobrecarga) en la multiplexación.

Velocidades binarias en Europa:

E0	=	64 kb/s	
E1	= 32 × E0	= 2 048 kb/s	se denomina 2 Mb/s
E2	= 4 × E1	= 8 448 kb/s	se denomina 8 Mb/s
E3	= 4 × E2	= 34 368 kb/s	se denomina 34 Mb/s
E4	= 4 × E3	= 139 264 kb/s	se denomina 140 Mb/s
E5	= 4 × E4	= 564 992 kb/s	se denomina 565 Mb/s

Utilizado para enlaces troncales entre centrales telefónicas conmutadas con velocidades 2, 8, 34 y 140 Mb/s dependiendo de la capacidad requerida.

SDH

Se creó para el transporte de todo tipo de señales (incluida la propia PDH): PDH, Ethernet, ATM (*Asynchronous Transfer Mode*), IP...

Es necesaria una sincronización de todos los elementos de la red, para lo cual se utilizan unos bits que indican para cada señal de entrada al equipo la calidad de su temporización.

Velocidades binarias: Multiplexaciones $\times 4$ a partir de STM-1 (*Synchronous Transport Module*).

Multiplexación **byte a byte**.

STM-1	=	155,52 Mb/s	se denomina	155 Mb/s
STM-4	= 4 \times STM-1	= 622,08 Mb/s	se denomina	622 Mb/s
STM-16	= 4 \times STM-4	= 2 488,32 Mb/s	se denomina	2,5 Gb/s
STM-64	= 4 \times STM-16	= 9 953,28 Mb/s	se denomina	10 Gb/s
STM-256	= 4 \times STM-64	= 39 813,12 Mb/s	se denomina	40 Gb/s
:				

No añade bytes extra en la multiplexación.

Compatibilidad total entre los fabricantes: todos bits de las tramas están completamente definidos.

La gestión de los equipos es muy potente y con gran cantidad de información de alarmas y eventos completamente definidos en el estándar y utilizado de igual forma por todos los fabricantes.

Apéndice: constantes

Valores de las constantes físicas de acuerdo con el CODATA (*Committee on Data for Science and Technology*):

Velocidad de la luz en el vacío: $c = 299\,792\,458$ m/s

Constante de Planck: $h = 6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34}$ J·s

Carga elemental: $e = 1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19}$ C

Constante de Boltzmann: $k = 1,380\,649 \cdot 10^{-23}$ J/K

Permitividad eléctrica del vacío: $\varepsilon_0 = 8,854\,187\,8128(13) \cdot 10^{-12}$ F/m

Permeabilidad magnética del vacío: $\mu_0 = 1,256\,637\,062\,12(19) \cdot 10^{-6}$ N/A²

$$c = 1/\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}$$

Apéndice: alfabeto griego en fórmulas

Mayús.	Minúsc.	Nombre español
A	α	alfa
B	β	beta
Γ	γ	gamma
Δ	δ	delta
E	ϵ, ε	épsilon
Z	ζ	dseta
H	η	eta
Θ	θ, ϑ	zeta
I	ι	iota
K	κ	kappa
Λ	λ	lambda
M	μ	mi
N	ν	ni
Ξ	ξ	xi
O	\omicron	ómicron
Π	π, ϖ	pi
P	ρ, ϱ	ro
Σ	σ, ς	sigma
T	τ	tau
Υ	υ	ípsilon
Φ	ϕ, φ	fi
X	χ	ji
Ψ	ψ	psi
Ω	ω	omega

Apéndice: suma de señales. Ganancia

Suma de señales:

La potencia resultante de la suma de dos señales depende del grado de coherencia de las mismas. Si las señales son:

- coherentes (misma frecuencia y fase), se suman en tensión: $v_t = \sum_i v_i$,
- incoherentes (sin correlación), se suman en potencia: $p_t = \sum_i p_i$.

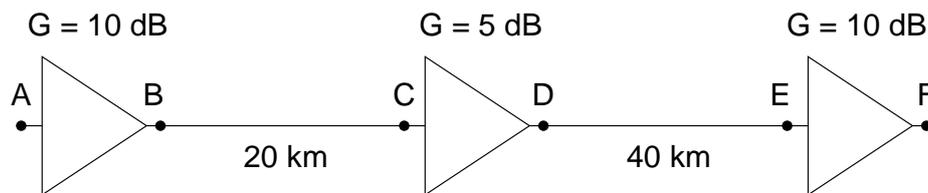
Ganancias en tensión y en potencia:

La relación entre las potencias de una señal en dos puntos 1 y 2 de un sistema se llama ganancia en potencia, o simplemente ganancia: $g = \frac{p_2}{p_1}$.

La relación entre sus tensiones se llama ganancia en tensión: $g_v = \frac{v_2}{v_1}$.

Problema 1.1

Se tiene un canal telefónico de baja frecuencia constituido por tres amplificadores y dos tramos de cable de diámetro $\varnothing = 0,91$ mm.



Si se aplica en A un tono de 800 Hz a -5 dBm:

- 1.) Obtener los niveles absolutos en B, C, D, E y F.
- 2.) Expresar, en dBm y dBW, la potencia del tono en el punto D.
- 3.) Si la impedancia de salida del tercer amplificador es de 300Ω , calcular la tensión eficaz, en mV, cuando se le carga con esa misma impedancia.
- 4.) Calcular la atenuación, expresada en unidades naturales, de potencia y de tensión del primer tramo de cable suponiendo las impedancias de B y C idénticas.

Dato adicional:

- Atenuación del cable de $\varnothing = 0,91$ mm a 800 Hz: $\alpha = 0,5$ dB/km.

Problema 1.2

Calcular el nivel de potencia total en una impedancia de $Z = 300 \Omega$ sobre la que inciden:

- 1.) Dos tonos coherentes, ambos de -10 dBm.
- 2.) Dos señales incoherentes, ambas de -10 dBm.

Problema 1.3

Calcular la ganancia en tensión y en potencia de los siguientes amplificadores:

$$1.) \frac{v \text{ V}}{R \ \Omega} \begin{array}{c} \nearrow g \\ \searrow g_v \end{array} \frac{5v \text{ V}}{R \ \Omega}$$

$$2.) \frac{v \text{ V}}{R \ \Omega} \begin{array}{c} \nearrow g \\ \searrow g_v \end{array} \frac{5v \text{ V}}{3R \ \Omega}$$

$$3.) \frac{4 \text{ dBm}}{R \ \Omega} \begin{array}{c} \nearrow g \\ \searrow g_v \end{array} \frac{7 \text{ dBm}}{3R \ \Omega}$$

Problema J97T1

Un circuito telefónico consta de tres amplificadores iguales, unidos mediante dos tramos de cable de pares de igual longitud. Sabiendo que la impedancia de salida de los amplificadores es de 300Ω , y que a la salida del tercer amplificador se mide una tensión de $6,2 \text{ V}$:

- 1.) Calcular el nivel de potencia a la salida del tercer amplificador, en dBm.
- 2.) Si además se sabe que: la ganancia de los amplificadores es de 3 dB , los tramos de cable tienen una longitud de 10 km , y a la entrada del primer amplificador se mide un nivel de 27 dBm , determinar la atenuación por unidad de longitud del cable.
- 3.) Dibujar el diagrama de niveles absolutos del circuito.
- 4.) Calcular la tensión, en V , medida a la salida del segundo amplificador.

Soluciones

1.1

- 1.) $L_A = -5 \text{ dBm}$, $L_B = 5 \text{ dBm}$, $L_C = -5 \text{ dBm}$, $L_D = 0 \text{ dBm}$, $L_E = -20 \text{ dBm}$, $L_F = -10 \text{ dBm}$
- 2.) $L_D = 0 \text{ dBm} = -30 \text{ dBW}$
- 3.) $v_F = 173,5 \text{ mV}$
- 4.) $a_v = 3,16$

1.2

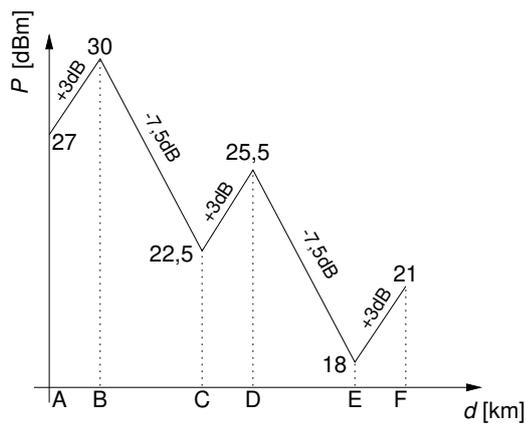
- 1.) $-3,99 \approx -4 \text{ dBm}$
- 2.) $-6,99 \approx -7 \text{ dBm}$

1.3

- 1.) $g_v = 5$; $g = 25$
- 2.) $g_v = 5$; $g = 8,33$
- 3.) $g_v = 2,45$; $g = 2,00$

J97T1

- 1.) $L_F = 21 \text{ dBm}$
- 2.) $\alpha = 0,75 \text{ dB/km}$
- 3.)



- 4.) $v_D = 10,33 \text{ V}$