

Aprobado 27/VI/2003

Apuntes de Comunicaciones Ópticas 1
4º ETSI Telecomunicación
Universidad de Málaga

Carlos García Argos (garcia@ieee.org)
<http://www.telecos-malaga.com>

Curso 2002/2003

INDICE (C.O.1)

TEMA 1: INTRODUCCIÓN A LAS COMUNICACIONES ÓPTICAS	1
1.1- Antecedentes y evolución histórica	1
1.2- Espectro óptico	2
1.3- Fuentes ópticas y fotodetectores	2
1.4- Sistemas de comunicaciones ópticas guiadas	4
1.5- Sistemas de comunicaciones ópticas no guiadas	9
TEMA 2: FUNDAMENTOS DE ÓPTICA	11
2.1- Aproximaciones en el estudio de fenómenos ópticos	11
2.2- Óptica geométrica	11
2.3- Óptica ondulatoria: difracción	31
2.4- Óptica estadística: coherencia de una fuente de luz	43
TEMA 3: GUÍAS DIELECTRICAS	49
3.1- Fibra óptica: tipos, mecanismos de propagación y aplicaciones	49
3.1.1- Tipos de fibras	50
3.1.2- Mecanismo de propagación	51
3.1.3- Aplicaciones	53
3.2- Análisis modal de la guía Slab	54
3.2.1- ¿Qué necesitamos conocer sobre la fibra óptica?	54
3.2.2- La guía Slab	55
3.2.3- Soluciones TE (modos TE)	59
3.2.4- Modos TM	69
3.2.5- Interpretación geométrica de los resultados	70
3.3- Análisis modal de la fibra óptica	72

TEMA 4: CARACTERÍSTICAS DE TRANSMISIÓN DE LA FIBRA ÓPTICA	75
4.1- La fibra óptica como sistema lineal	75
4.2- Atenuación	79
4.3- Dispersión	80
4.3.1- Tipos de dispersión: descripción cualitativa	80
4.3.2- Dispersión intramodal	85
4.3.3- Dispersión intermodal	99
4.3.4- Fibra óptica de perfil de índice gradual	101
4.3.5- Dispersión global	101
4.4- Fibra óptica en régimen no lineal	102

TEMA 5: ACOPLAMIENTO Y UNIÓN DE FIBRAS ÓPTICAS	107
5.1- Acoplamiento al elemento fotoemisor	107
5.2- Unión entre fibras	113

TEMA 1: INTRODUCCIÓN A LAS COMUNICACIONES ÓPTICAS

1.1- ANTECEDENTES Y EVOLUCIÓN HISTÓRICA

1.2- ESPECTRO ÓPTICO

1.3- FUENTES ÓPTICAS Y FOTODETECTORES

1.4- SISTEMAS DE COMUNICACIONES ÓPTICAS GUIADAS

1.5- SISTEMAS DE COMUNICACIONES ÓPTICAS NO GUIADAS

1.1- ANTECEDENTES Y EVOLUCIÓN HISTÓRICA

(Transparencia)

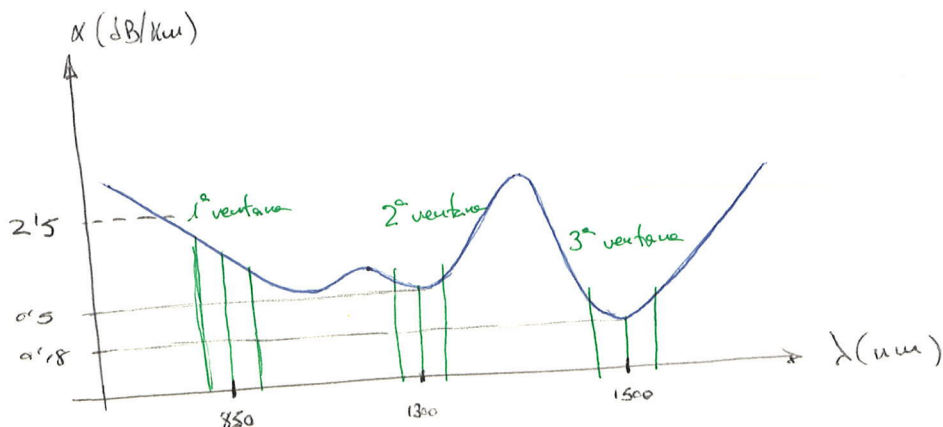
- 1966: primera fibra óptica (Kao y Hockham)

- Años 70: mucha atenuación: $\alpha \approx 1000 \text{ dB/km}$

Coaxial $\rightarrow \alpha \approx 5-10 \text{ dB/km}$

Para reducir la atenuación se empezó a purificar el material.

Hoy en día $\alpha \approx 0.2 \text{ dB/km}$



$\rightarrow$ los dispositivos a estas frecuencias son más baratos

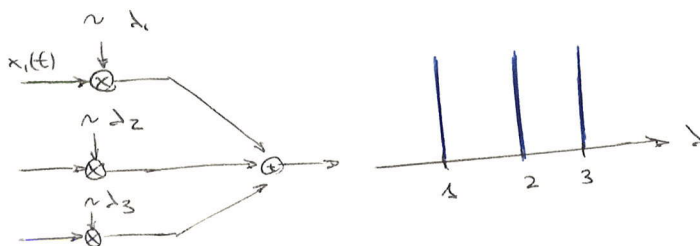
1.2 - ESPECTRO ÓPTICO

(Transparencia)

En la 3ª ventana de la fibra la longitud de onda va de 1500 a 1600 nm, que nos da un ancho de banda de unos 15.000 GHz.

Para aprovechar el ancho de banda podemos usar:

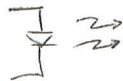
- MDF (Multiplexador por División en Frecuencia)



El problema es que necesitamos luz a una sola frecuencia (monocromática).

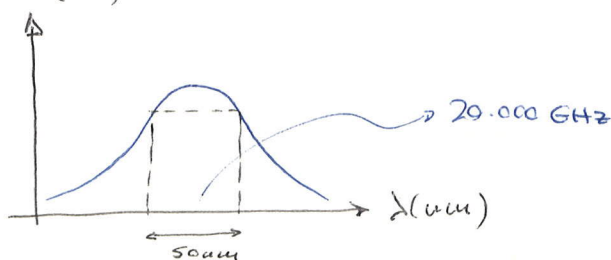
1.3 - FUENTES ÓPTICAS Y FOTODTECTORES

- LED
- LASER

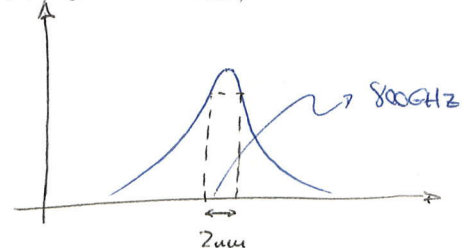


La potencia de luz que emiten es proporcional al corriente que pasa por ellos

DEP (LED)



DEP (LASER MALOS)

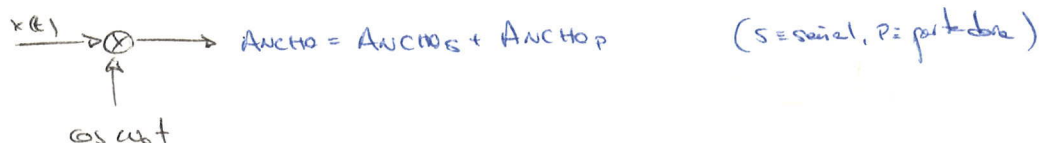


[LASER = Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation]

Hay se llega a decenas de nm.

Hoy en día aún no se puede aprovechar totalmente el ancho de banda de la Fibra (3^{er} ventana $\rightarrow 100 \text{ nm} \approx 15.000 \text{ GHz}$)

¿Cómo aprovechar un ancho de banda grande? $\rightarrow$ multiplexar

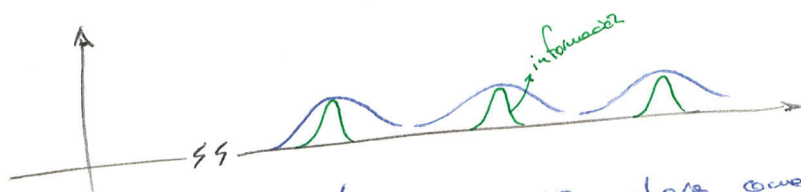
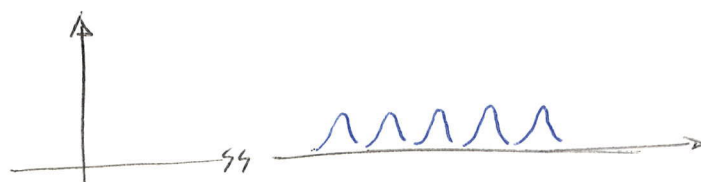


Distinguimos entre radiofrecuencia (RF) y óptica. En RF el ancho de la portadora es casi mb, mientras que en óptica no sólo no es despreciable sino que a veces tienen un ancho mayor que la señal.

$$\rightarrow \text{RF} \Rightarrow \text{ANCHOP} = \text{ANCHOS}$$

$$\rightarrow \text{óptica} \Rightarrow \text{ANCHOP} = \text{ANCHOS} + \text{ANCHOP}$$

Por tanto, en comunicaciones ópticas este esquema no es tan bueno para aprovechar el ancho de banda como en RF.

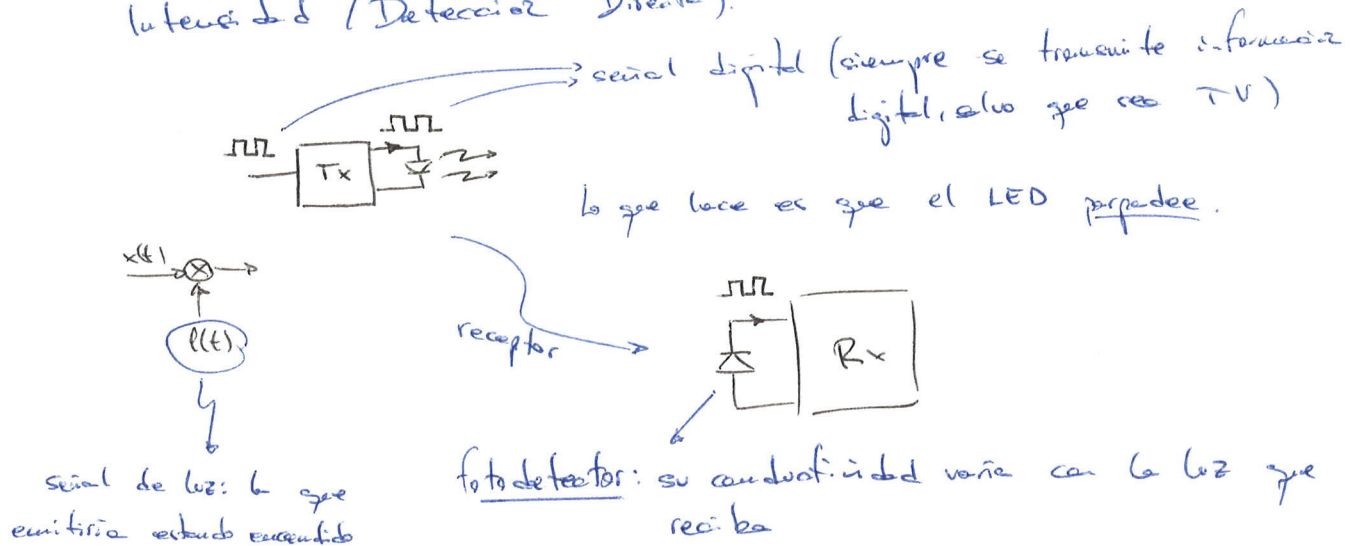


- esta es lo que se usa ahora comercialmente
- el receptor es más una fuente de ruido que un receptor convencional
- en laboratorio se usan fuentes ópticas monocromáticas.

1.4- SISTEMAS DE COMUNICACIONES ÓPTICAS GUIADAS

1.4.1- TÉCNICAS DE TRANSMISIÓN POR FIBRA

- La técnica que funciona actualmente en todos los sistemas de transmisión por fibra es el IM/DD (Modulación de Intensidad / Detección Directa).



$x(t)$ analógica $\Rightarrow$ DBL

$x(t)$ digital $\Rightarrow$ PAM binaria $\rightarrow$ Modulación de Intensidad

Detección Directa $\equiv$ la potencia de luz se convierte directamente en corriente

Esta técnica se usó en los generadores: (años 70)

- 1ª generación, en la 1ª ventana y con fibras multimodo
- 2ª generación, en la 2ª ventana y fibra monomodo
- 3ª generación (actual), en la 3ª ventana y fibra monomodo

Con esta técnica se consiguen alcances de 150 km a 17 Gbps sin repetidores, y 10 Gbps a 7000 km con repetidores.

- Técnicas coherentes: a nivel de laboratorio (no comercial, sino experimental) se consiguen LASERES aproximadamente monocromáticos. Se abre así la posibilidad de usar técnicas de RF a frecuencias ópticas, básicamente modulaciones angulares (se llama PSK), así como recepción superheterodina $\Rightarrow$ mayor sensibilidad en el receptor, mayor selectividad y mayor inmunidad al ruido.

Inconvenientes:

- sistema complejo
- sistema costoso
- muy sensible a la estabilidad del LASER

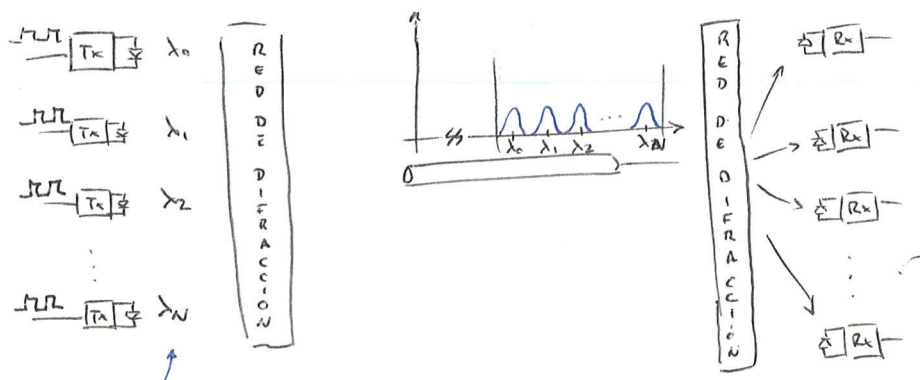
Esta técnica es de la 4ª generación, empezó en los años 80 y por estos inconvenientes se abandonó, sobre todo al llegar los amplificadores ópticos (años 90)

• (D)WDM:

(Dense) Wavelength Division Multiplexing

También hay HDWDM (Hiper Densa).

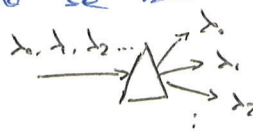
Es una FDM, pero en comunicaciones ópticas se habla de longitudes de onda en lugar de frecuencias



longitudes de onda

diferentes (son LASERES): cada una en un TX/DX

Para separar las distintas longitudes de onda en recepción se usa un PRISMA, en el se basa la red de difracción.



Ejemplo comercial:

Pirelli $\rightarrow$ TERANUX

Permite 1'28 Tbps en 128 canales y una separación de 0'5 nm. Distancia 6.000 km

Ejemplo experimental: (transparencia)

Tj: fcu

90 repetidores, uno cada 80 km

2'11 Tbps

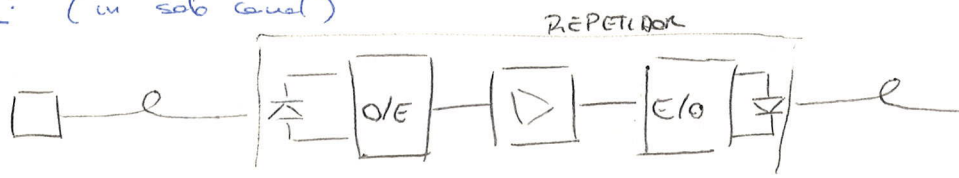
7 290 km

$\Delta\lambda = 0'3 \text{ nm}$

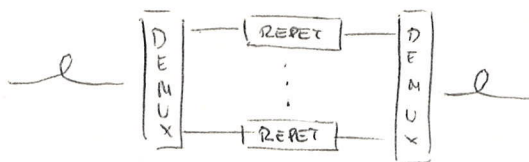
211 canales

Para enlaces largos necesitamos amplificadores:

- opión 1: (un solo canal)



no es una opción deseable, se puede usar si - muchos problemas para un solo canal. Para varios necesitaría un repetidor para cada uno:



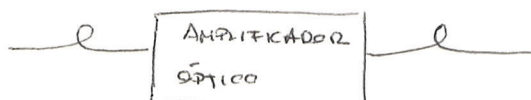
x costosos: $Rx + Tx +$ procesamiento electrónico (cada Tx lleva un laser)

x dependientes del tipo de modulación

x alto consumo de potencia

x impuesto límite al máximo régimen binario y nº de canales.

- opión 2: no hay conversión eléctrica



tiene un ancho de banda tal que es capaz de amplificar toda la 3ª ventana de una vez en la modulación que lleve

- Técnica solitónica: no hay todavía implementaciones comerciales, sólo en laboratorio



los pulsos se usan para transmitir información binaria, al ensancharse pueden llegar a solaparse y puede que no lleguen a distinguirse.

Por tanto, hay que separarlos lo suficiente a la entrada, así que la velocidad está limitada por arriba: máxima velocidad de transmisor digital.

El fenómeno de dispersión combinado con efectos no lineales de la fibra (controbato) puede producir pulsos que no se ensanchan. Estos pulsos se llaman SOLITONES.

Esta técnica es de la 5ª generación.

1.4.2- COMPARACIÓN FIBRA FRENTE A CABLE COAXIAL

• Ventajas:

1- Gran ancho de banda: $BW_F \rightarrow$ $\lambda (nm)$

En un coaxial: $BW_C = 500 MHz$

2- Atenuación reducida: $\alpha_F \approx 0.2 dB/km$
 $\alpha_C \approx 2 dB/km$

3- Pequeño peso y flexibilidad física

4- Aislamiento eléctrico e inmunidad a interferencias

5- Seguridad y privacidad de la información

6- Bajo coste potencial: materia prima $\Rightarrow$ Sílice
(SiO₂)

de muy abundante

• Inconvenientes:

1- El mayor de todos es sustituir las instalaciones de cable por fibra óptica

2- No permite la teleconferencia de equipos

1.5- COMUNICACIONES ÓPTICAS NO GUIADAS

Competir con los otros sistemas no guiados: radiocomunicaciones

los primeros sistemas se abandonaron por una serie de inconvenientes:

- dependencia de la luz solar
- necesidad de enlace visual
- variación en las condiciones atmosféricas
- existencia de la radiocomunicación

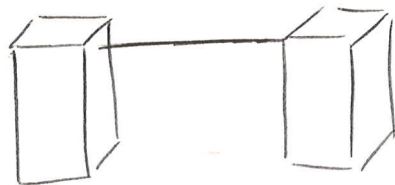
Ahora son más populares por:

- aparición del LASER $\Rightarrow$ fin de la dependencia de la luz solar
- espectro de radiocomunicación saturado

Hay 2 tipos de sistemas:

- exteriores: entre 2 edificios por ejemplo
enlace punto a punto.

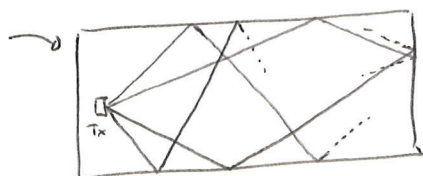
También se está
usando entre
satélites



ej: sistema SILEX (Google: "satellite optical link").

- interiores: sin enlaces difusos (no punto a punto)

habilitar
cinta desde
arriba)



se invade la habitación con las
reflexiones en las paredes
(difracción)

Aplicaciones: - electrónica de consumo: usando a distancia, auriculares
- conexión de ordenadores en LANs (WLAN)

- Ventajas:

1- Alta penetración de las ondas a frecuencias ópticas (no atraviesan las paredes) $\Rightarrow$ no hay interferencia

$\Rightarrow$ espectro reutilizable (en recintos contiguos)

$\Rightarrow$ no hay saturación del espectro

$\Rightarrow$ no está regulado (no hace falta)

2- Gran ancho de banda disponible

3- Seguridad y privacidad de la información

En exteriores: Directividad proporcional al tamaño de la antena λ

$\Rightarrow$ muy alta en ópticas

En interiores: no atraviesan las paredes

- Inconvenientes:

$\rightarrow$ En exteriores: 1- Necesidad de enlace visual

2- Dependencia de las condiciones atmosféricas

3- Al ser muy directivo, es difícil de apuntar

$\rightarrow$ En interiores: 1- Las ondas no atraviesan las paredes, por lo que no se pueden utilizar recintos cerrados

Las comunicaciones ópticas no giradas sólo son interesantes para algunas cosas muy concretas.



THE POSSIBILITIES ARE INFINITE

Fujitsu Laboratories Ltd.
2000-210E

Fujitsu Demonstrates 2.11 Terabit Fiber Optic DWDM Transmission Over 7,200km

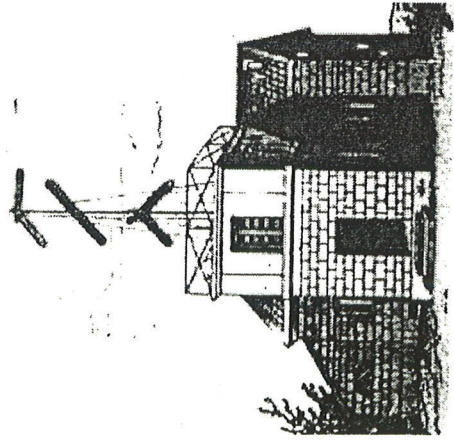
breakthrough development expected to pave way for trans-oceanic broadband transmission infrastructure to support explosive Internet growth

September 25, 2000 --- Fujitsu Laboratories Ltd. has successfully completed the world's first 7,200-kilometer transmission experiment using the multi-terabit optical dense wavelength division multiplex (DWDM) communications technology that will support the larger-capacity and higher-speed Internet of the future. This development is expected to enable trans-Atlantic transmission (over 6,500 kilometers) using a single optical fiber with 211 wavelength channels-each providing 10 gigabits per second data transmission for a total of 2.11 terabits/second. In addition, by adopting Raman amplification*1, Fujitsu was able to extend the repeater spacing from the former 50 kilometers to 80 kilometers, enabling a significant reduction in the number of optical repeaters. Fujitsu presented details of its development on September 7 at the European Conference on Optical Communication in Munich, Germany.

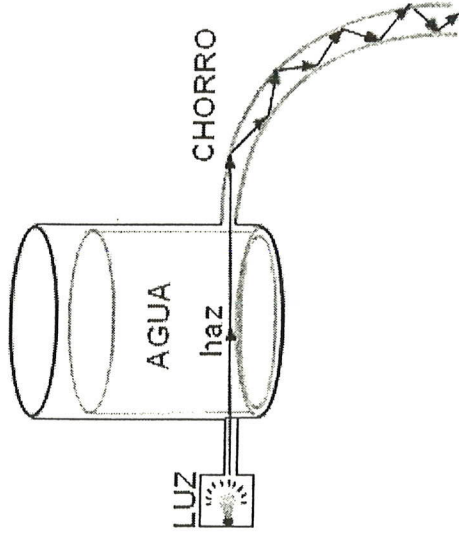
Development Background

The spread of the Internet is bringing global-scale changes to the way companies do business and people's lifestyles, and the worldwide demand for greater communications bandwidth and speed needed to take full advantage of the Internet is increasing by leaps and bounds. Since data transmission capacity increases in proportion to the number of wavelengths transmitted, dense wavelength division multiplexing (DWDM)-which enables the transmission of multiple optical wavelengths over a single optical fiber-has emerged as a key enabling technology to meet this demand. However, in the case of trans-oceanic long-distance transmission systems, a major challenge has been how to achieve large transmission capacity while extending repeater spacing. In order to assure a given signal-to-noise (S/N) ratio in a single stream of light, the optical amplification repeaters need to have a high output. On the other hand, in order to decrease the waveform distortion caused by the fiber non-linear effect*2, the light output

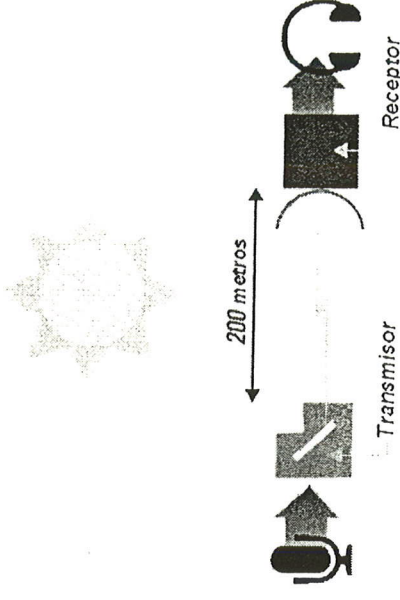
Eje cronológico evolución comunicaciones ópticas



Telégrafo óptico. 1792



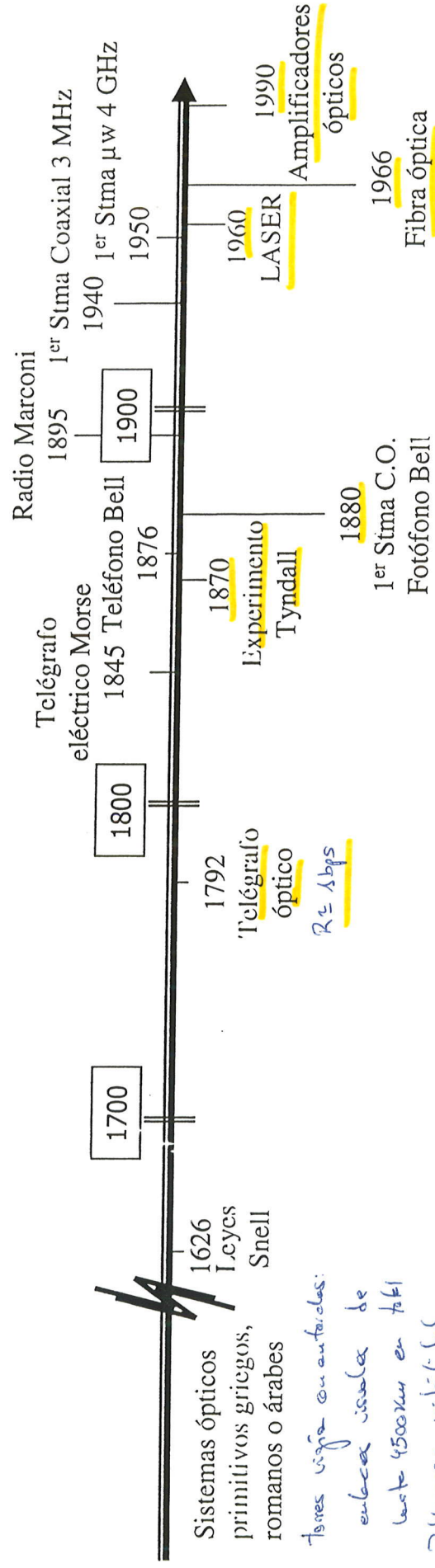
Experimento Tyndall. 1870



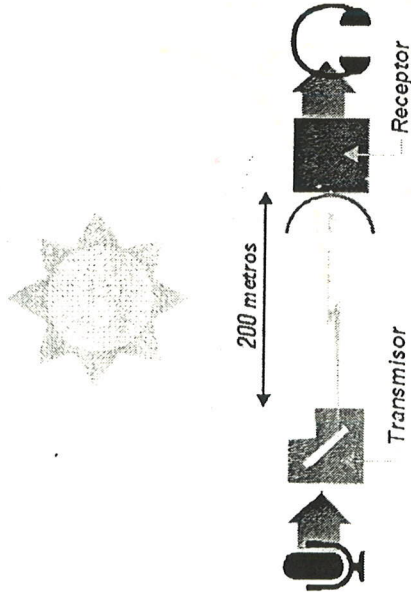
Fotófono Bell. 1880

Sistemas ópticos
primitivos griegos,
romanos o árabes

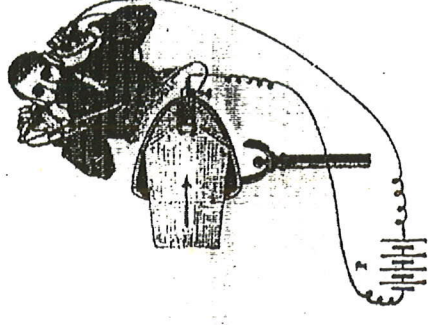
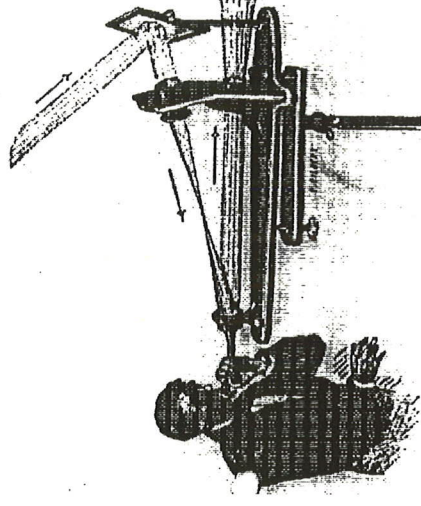
*primeras vigas en antenas:
enlaces visuales de
hasta 4500km en 1911
Problemas: visibilidad
directa y condiciones
atmosféricas*



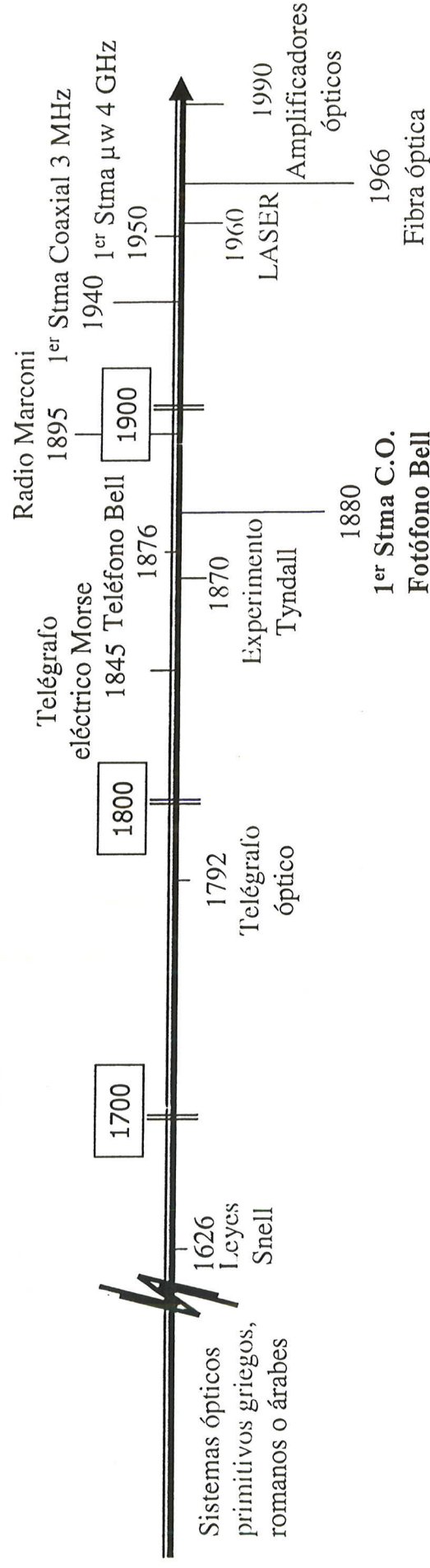
Eje cronológico evolución comunicaciones ópticas



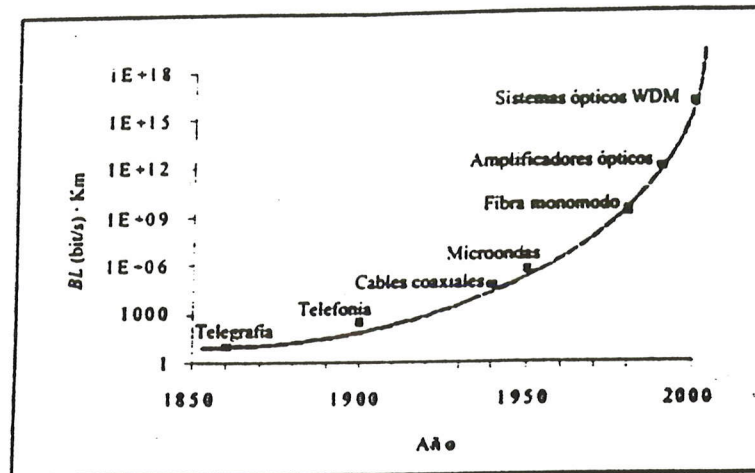
Fotófono de Bell (articulación)



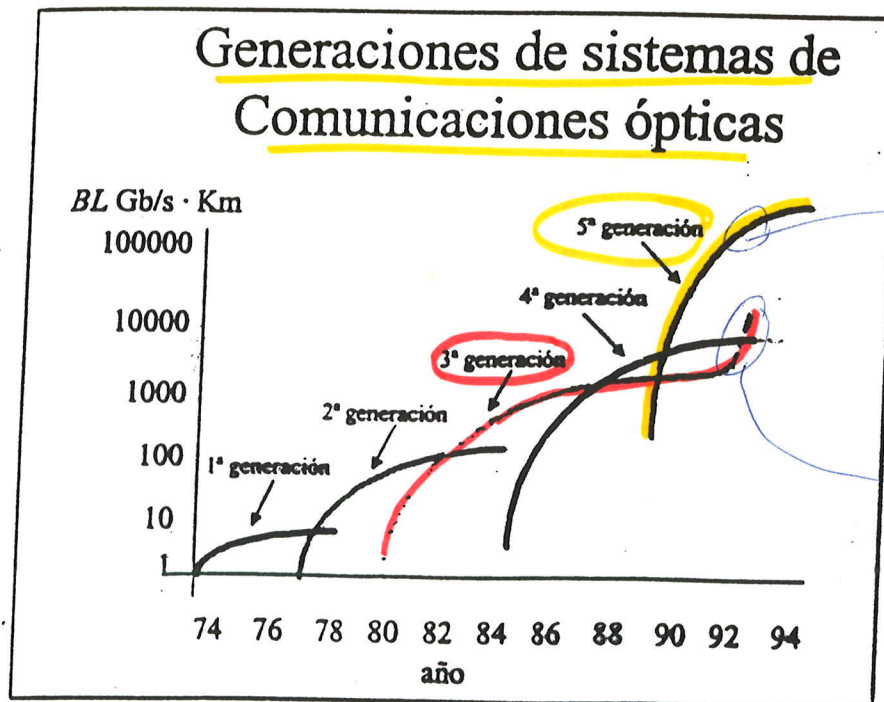
Fotófono Bell. 1880



Incremento del producto $B \times L$ en función de la tecnología empleada:



Generaciones de sistemas de Comunicaciones ópticas



5ª generación: se aprovechan efectos no lineales: "pulses solitones"

3ª generación: sigue en la actualidad con IM/DD y WDM