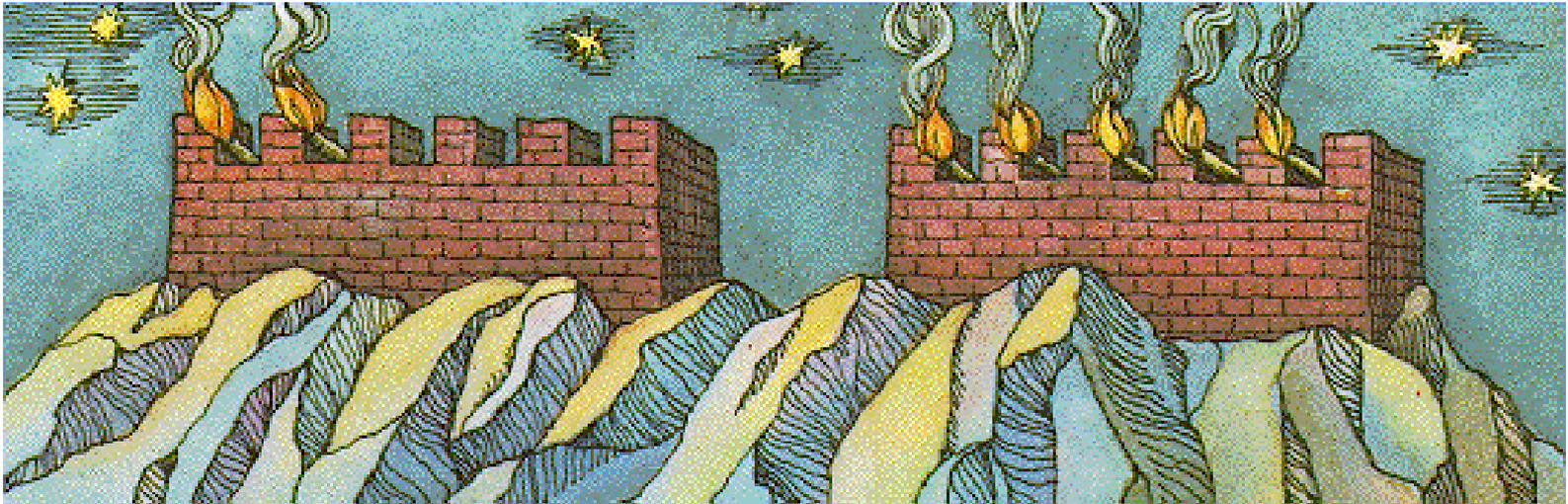


PSI 3481
SISTEMAS ÓPTICOS E DE MICRO-
ONDAS

SEGUNDA PARTE
SISTEMAS ÓPTICOS

Perspectiva Histórica

- .- Meios de comunicação utilizando sinais de fogo e fumaça
- .- Meios de comunicação utilizando sinais emitidas por lâmpadas

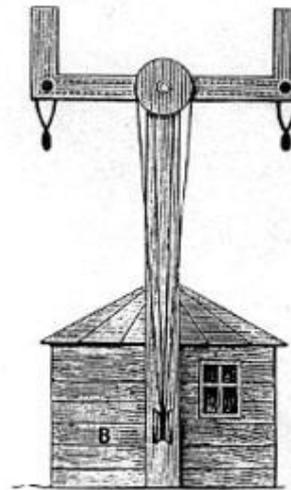


Perspectiva Histórica

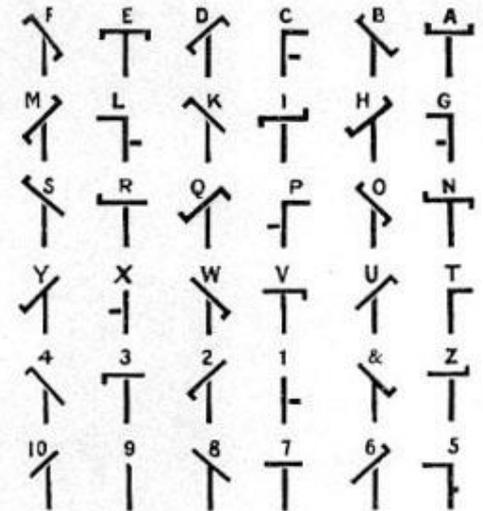
.- Telegrafo óptico– Claude Chappe (1763 – 1805)

.- Distancias: 100 Km a 200 Km

.- Taxa de transmissão: 1bit/s



Armenes og vingernes anbringelse ved Chappes telegraf



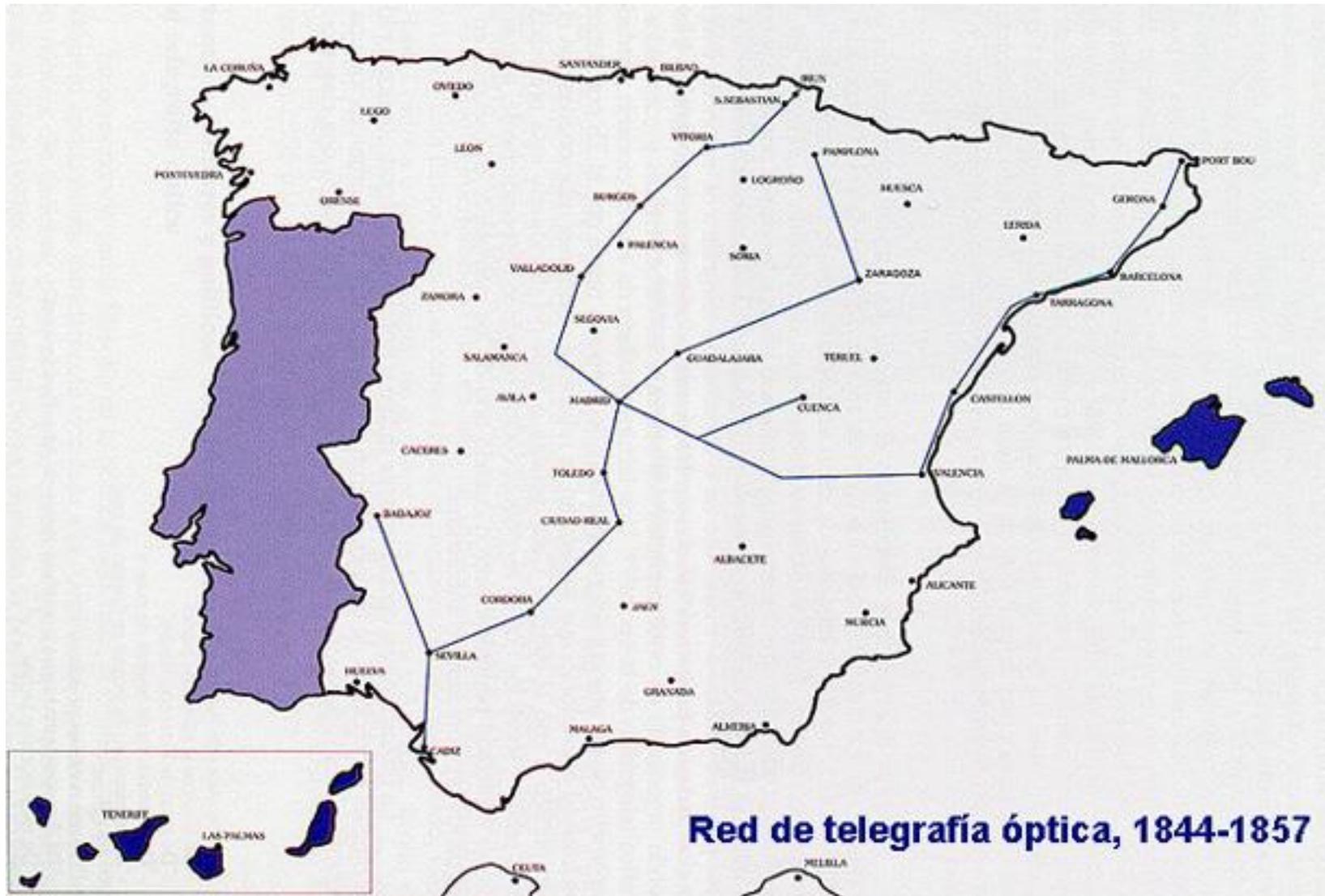
Armenes og vingernes stillinger for de forskellige bogstaver.

Perspectiva Histórica

Telegrafo óptico– Claude Chappe (1763 – 1805)



Rede de telegrafia óptica em Espanha



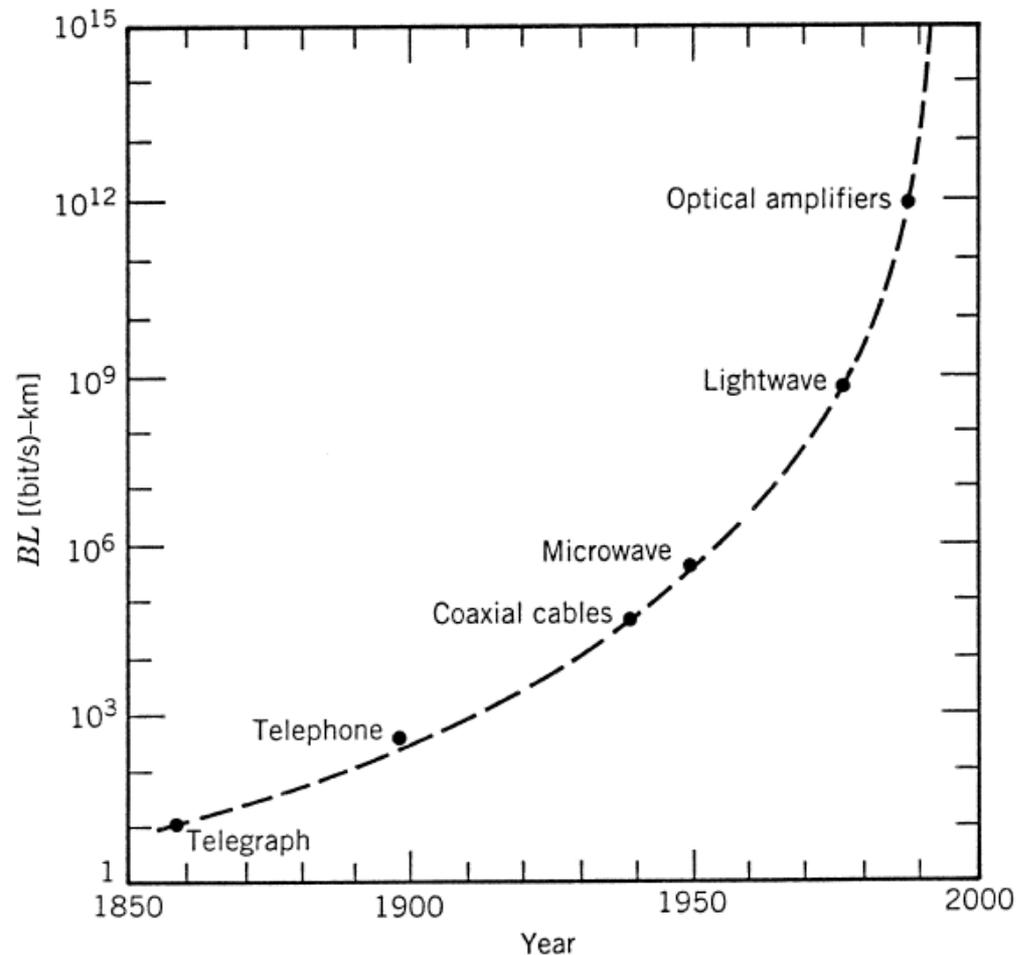
Perspectiva Histórica

- 1830 substituição da comunicação óptica por comunicação elétrica
- Telegrafo elétrico (código Morse) 10 b/s, 1000 km.
- 1866 foram instalados cabos elétricos transatlânticos.
- 1876 comunicação via telefone: sinais analógicos.
- 1940, introdução do cabo coaxial: Sinais de 3 MHz
- Comunicação de Micro-ondas: 1 – 10 GHz, 100 Mb/s.
- 1975 introdução de comunicação óptica via fibras ópticas.

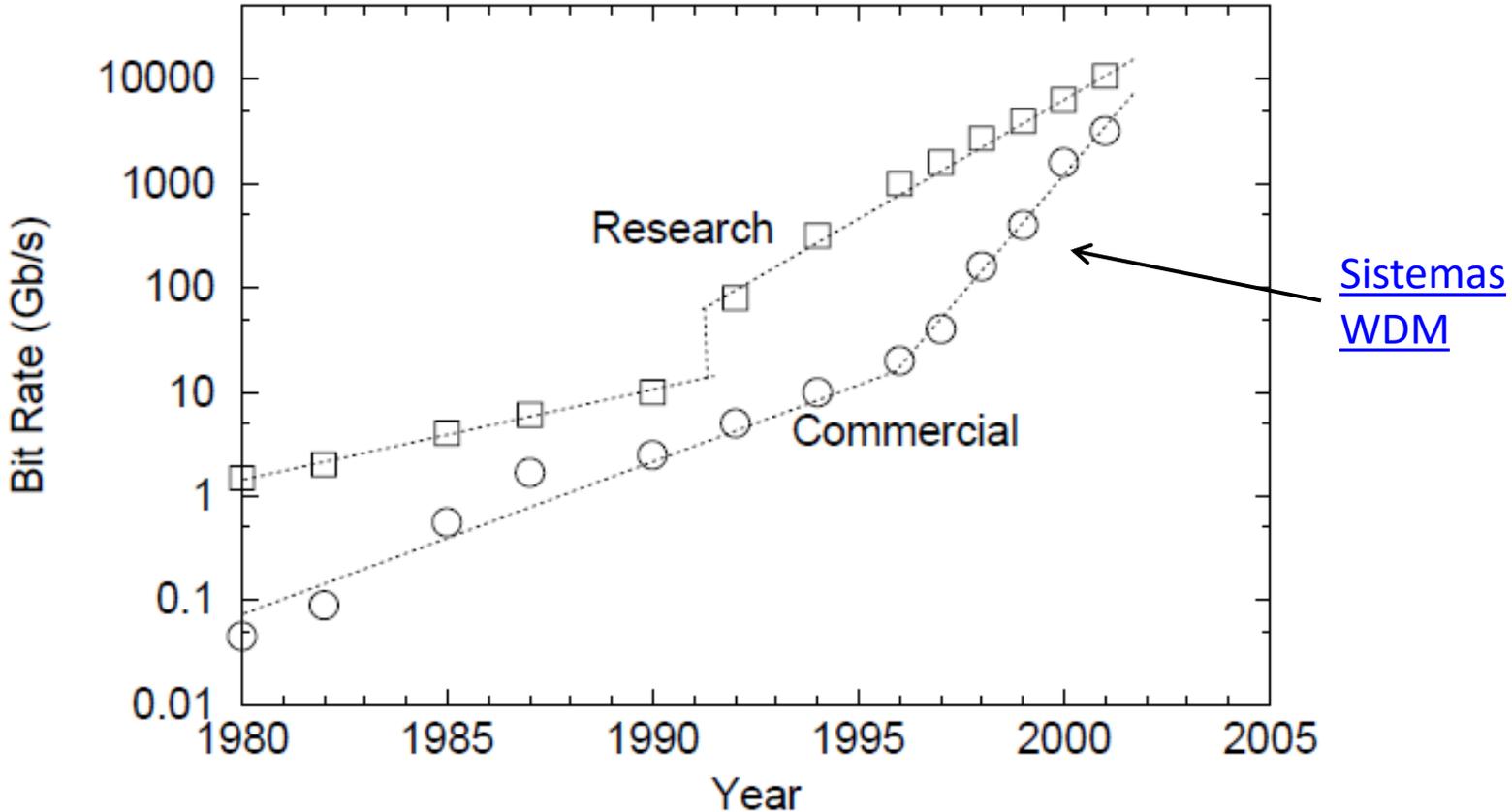
EVOLUÇÃO DOS SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO

Figura de mérito dos sistemas de comunicação:

BL = taxa de transmissão de dados x distancia [Gb/s – Km]

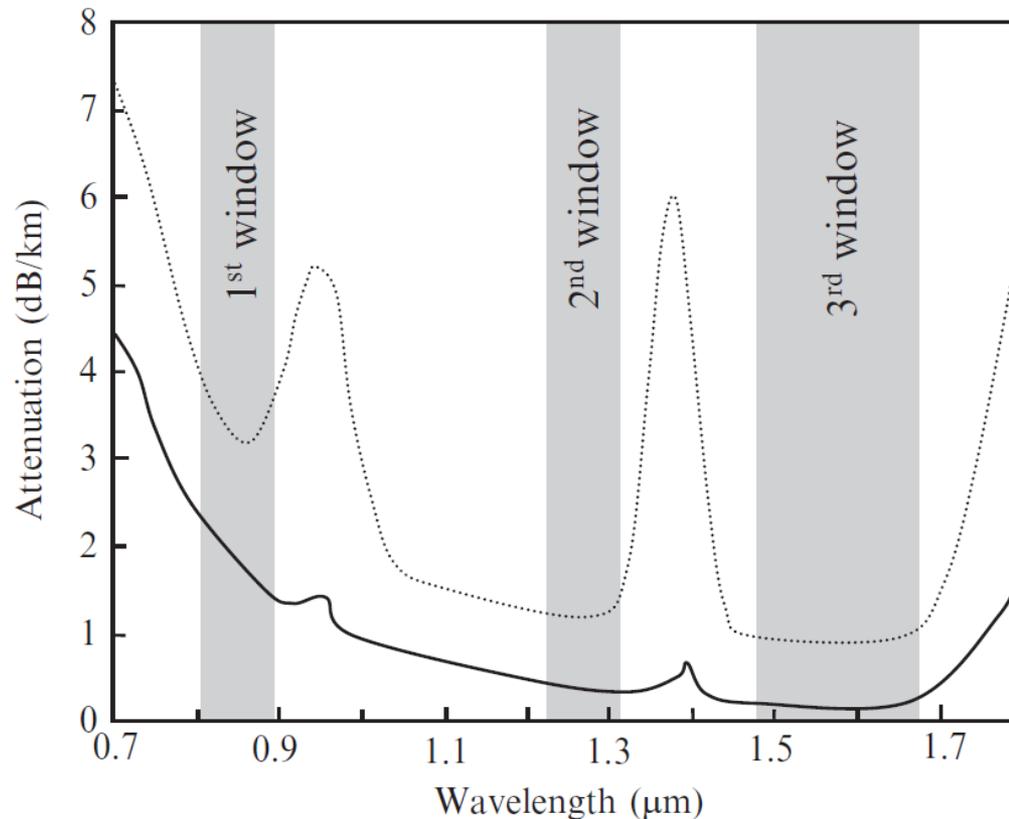


Crescimento de desempenho dos sistemas ópticos após 1980



Evolução dos sistemas de comunicação óptico

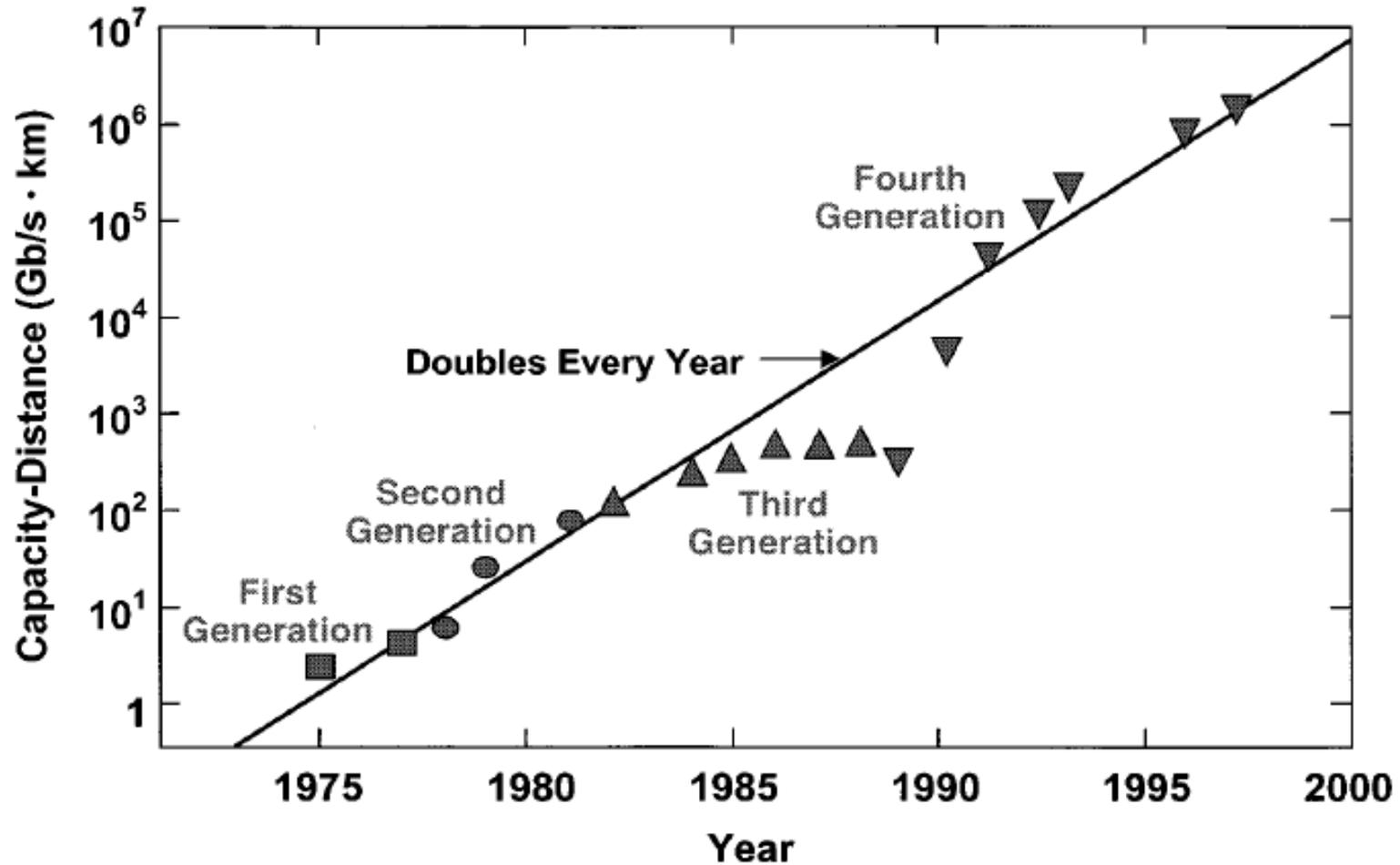
Comportamento espectral da atenuação de uma fibra óptica de Silica (SiO_2)



Evolução dos sistemas de comunicação óptico

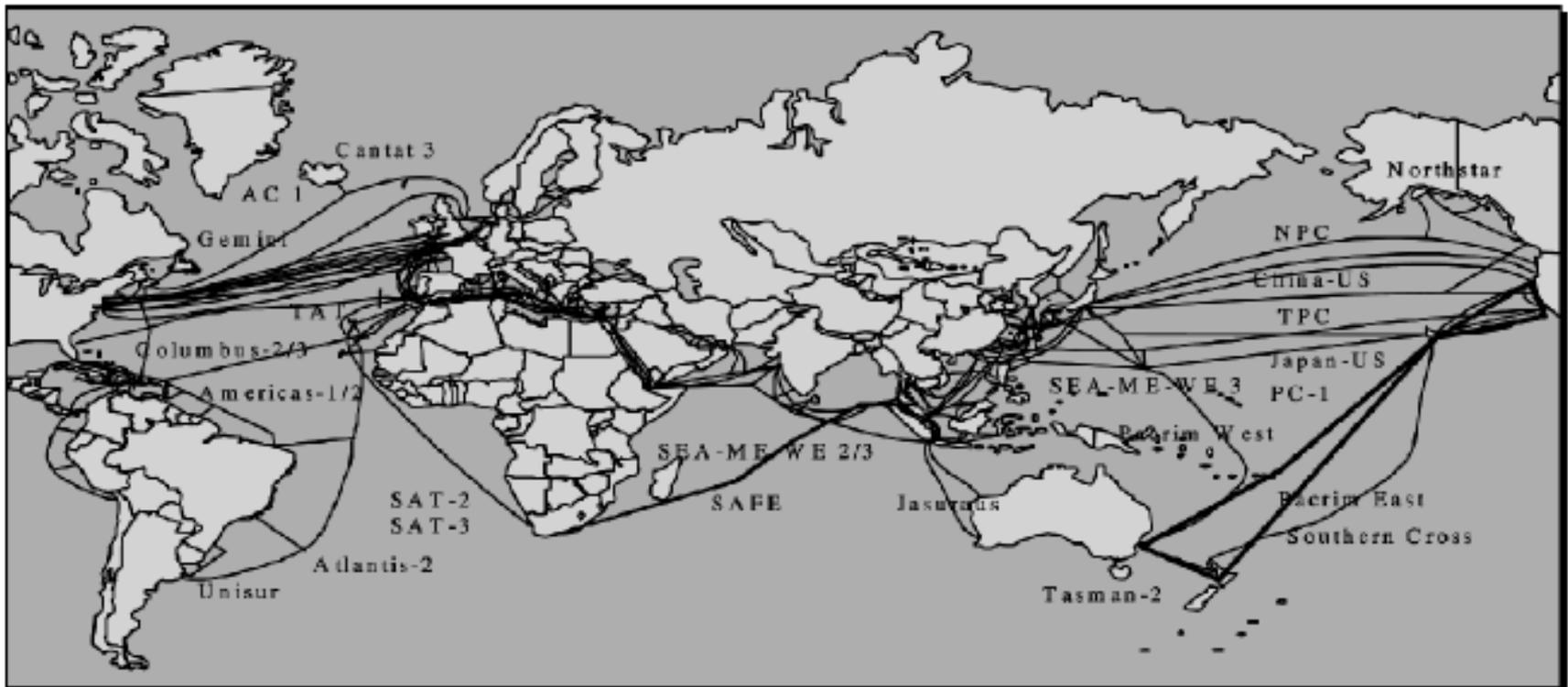
- 1975 Primeira geração: Laser de GaAs, 0.8 μm , 45 Mb/s, fibra óptica multimodo, 10 Km.
- 1987 Segunda geração: Laser de 1.3 μm , 2 Gb/s, fibra óptica mono-modo, 44 Km.
- 1990 Terceira geração: Laser de 1.55 μm , 10 Gb/s, fibra óptica mono-modo, 100 Km.
- 2001 Quarta geração: Amplificadores ópticos, sistemas WDM, 10 Tb/s.
- Solitons ópticos, 160 Gb/s por canal ?.

Evolução dos sistemas de comunicação óptico



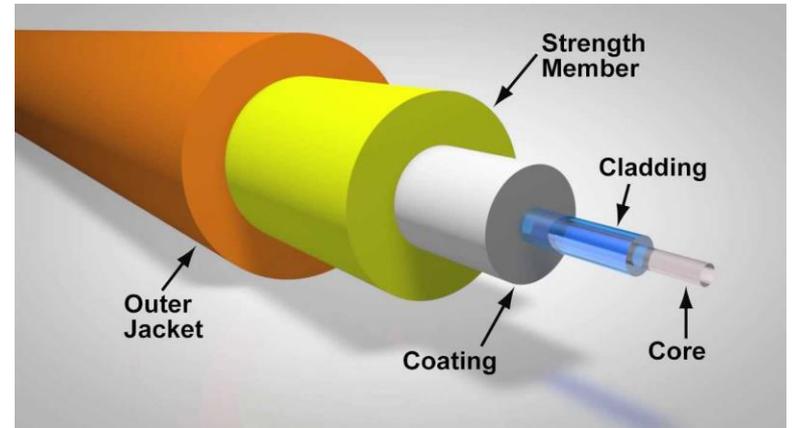
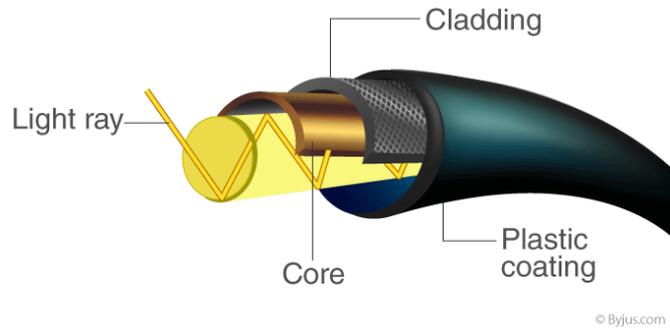
Evolução dos sistemas de comunicação óptico

.- Sistema Internacional de redes submarinas (2000)



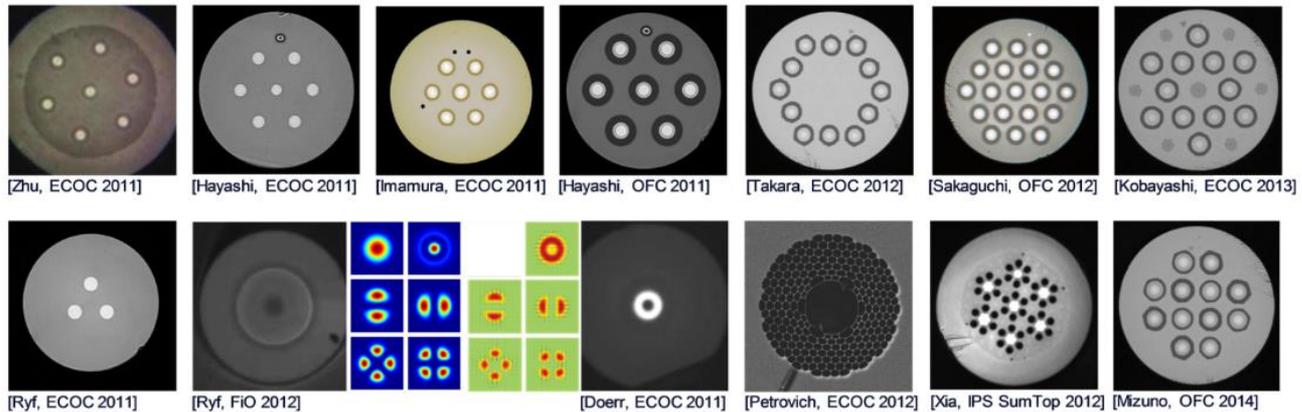
Fibras ópticas

OPTICAL FIBER



Fibras ópticas multimodo

Fibras ópticas monomodo

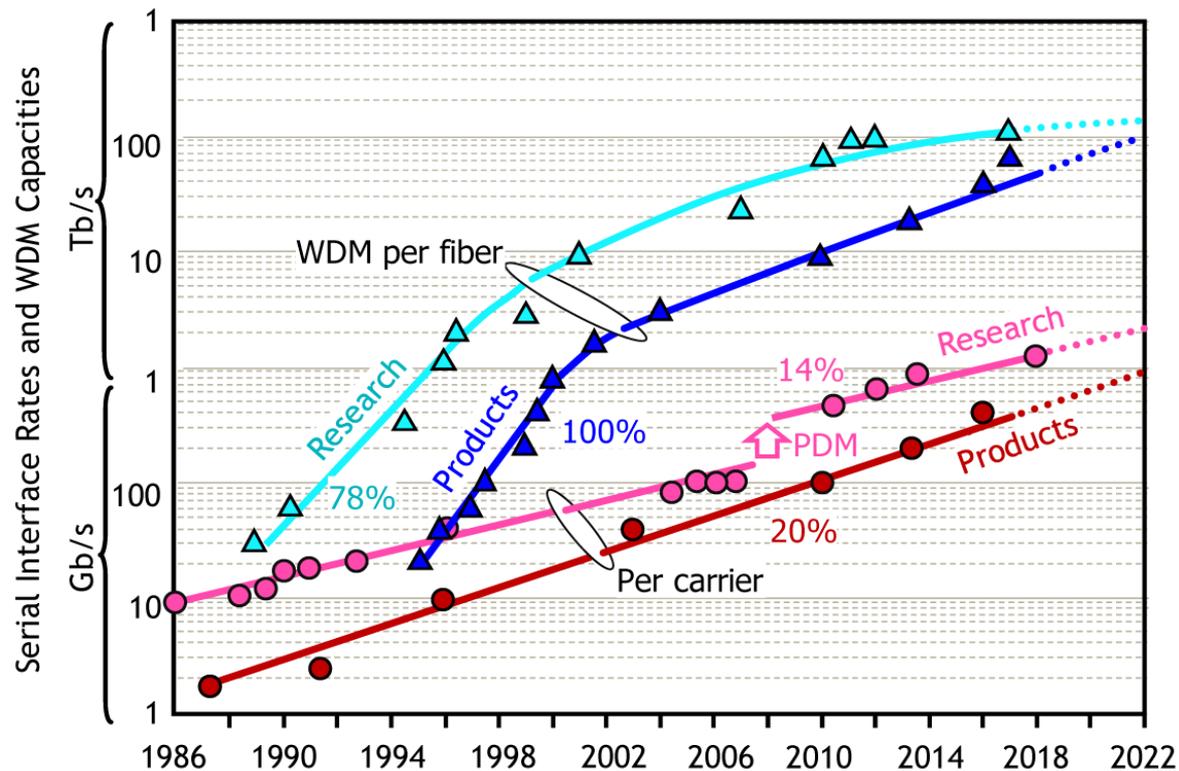


Fibras ópticas SDM “spatial division multiplexing”

A evolução das redes de comunicação de fibra óptica: Nos últimos 20 anos

- Era da regeneração de sinal óptico (1977-1995).
- A era dos sistemas com amplificação óptica e gerenciamento dos efeitos dispersivos (1995-2008).
- A era dos sistemas coerentes com amplificação óptica (2008 – presente).
- A era da multiplexação por divisão espacial (pesquisada ativamente desde ~ 2008)

A evolução das redes de comunicação de fibra óptica

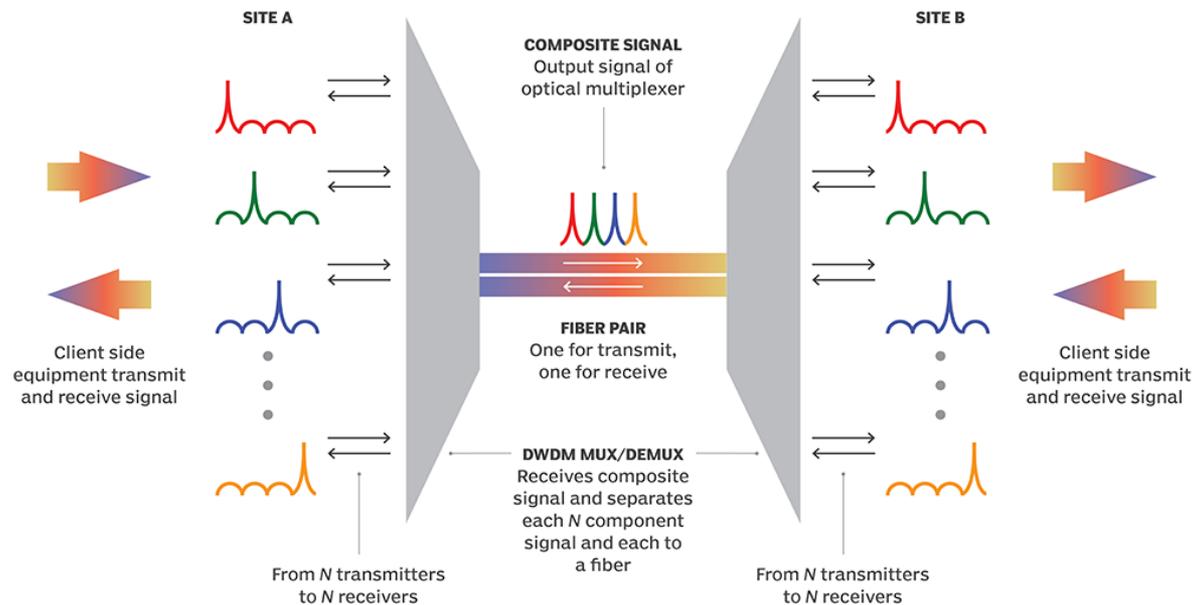


Comparação de sistemas comerciais e de pesquisa em termos de taxas por portadora e capacidades de WDM. A descontinuidade da interface por portadora única por volta de 2007 se deve à introdução da detecção coerente usando a multiplexação por divisão de polarização (PDM).

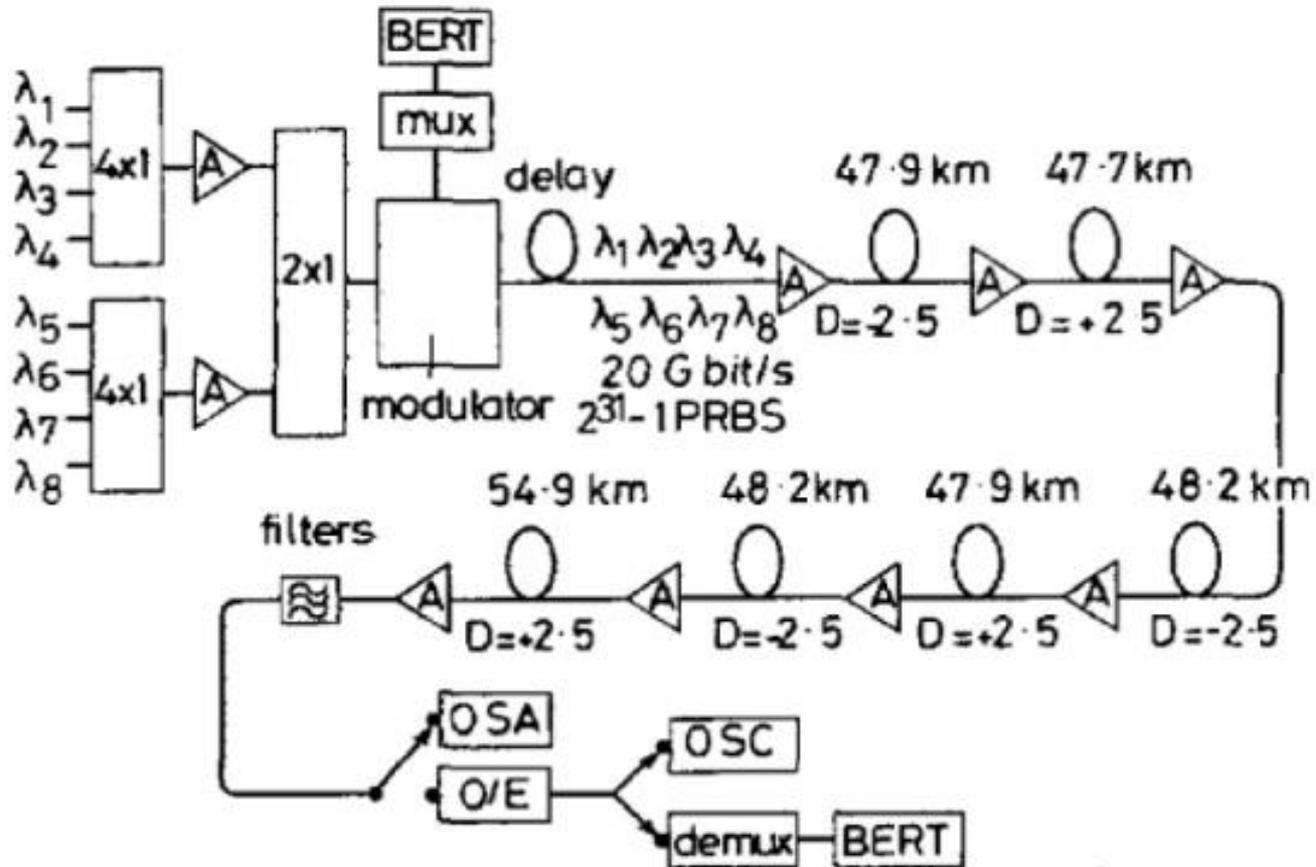
Sistemas WDM “Wavelength Division Multiplexing”

Dense wave division multiplexing

Bidirectional operation

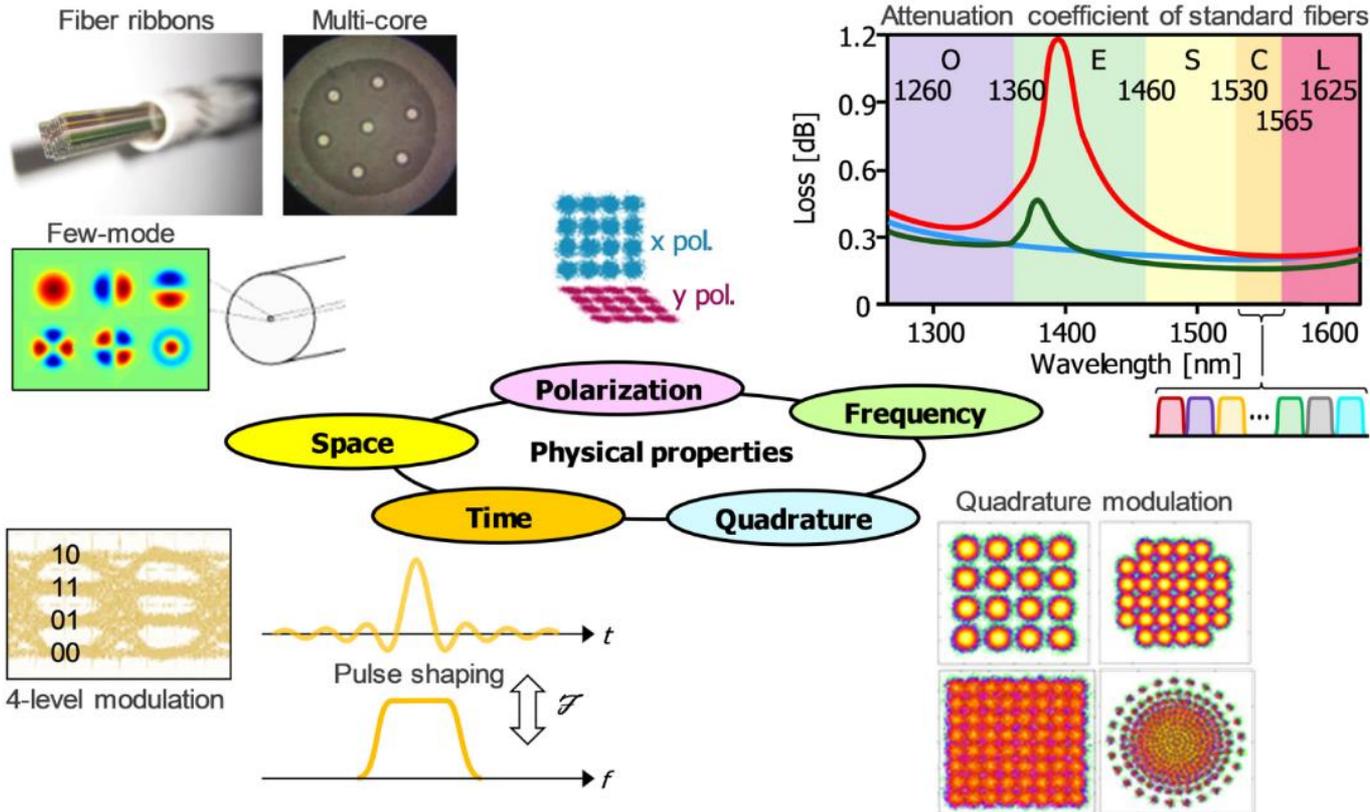


Sistemas WDM

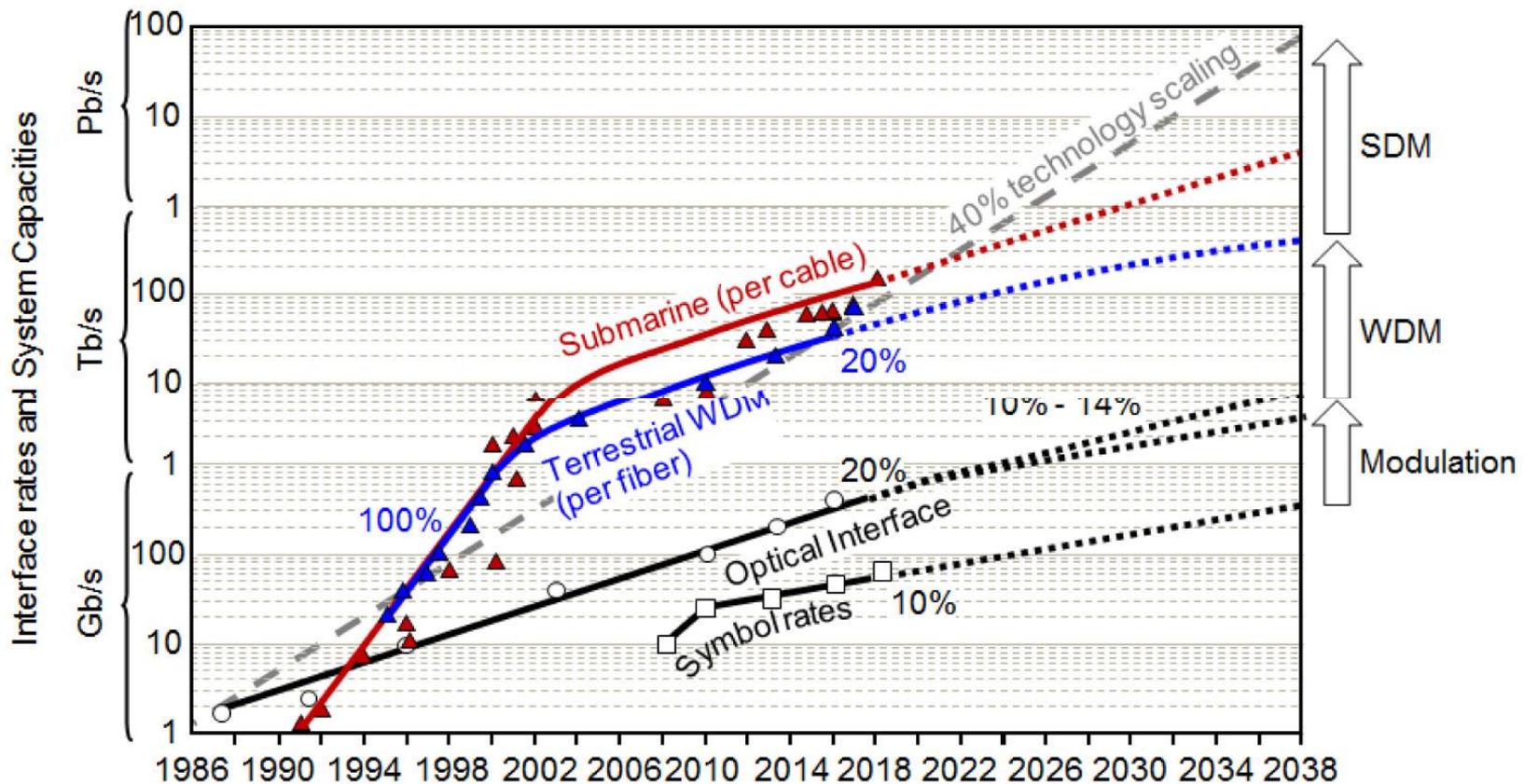


O "truque do modulador único", permitindo experimentos WDM massivos

Sistemas ópticos de elevado desempenho (Pbit/s)



Passado, presente e futuro dos sistemas de comunicação óptica



Passado, presente e futuro dos sistemas de comunicação óptica

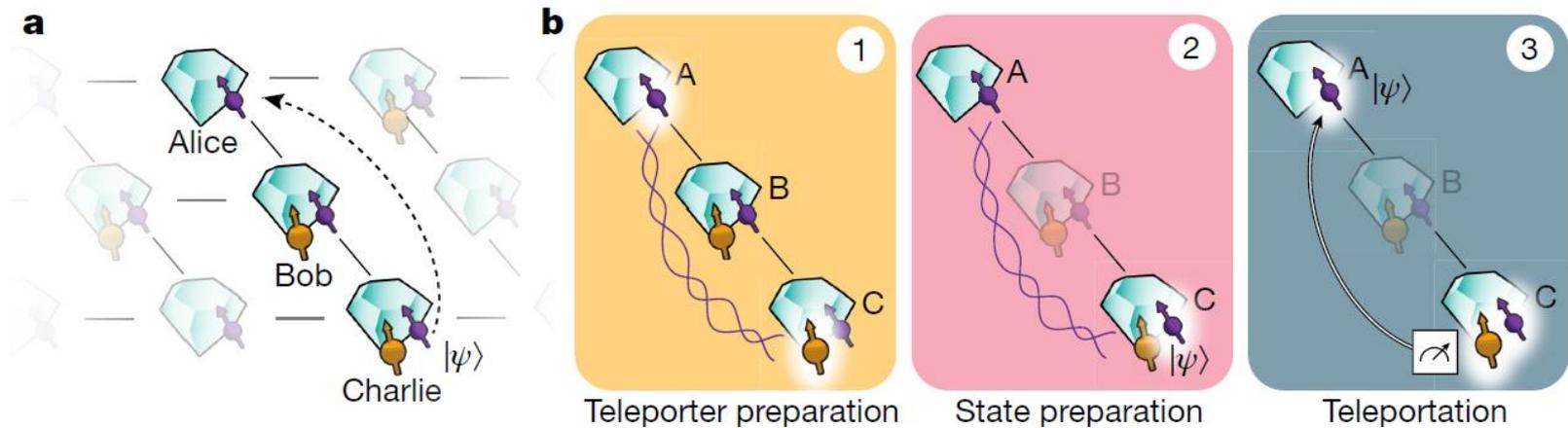
(counting both directions)

		1997		2017		2037
		Products	Research	Products	Research*	Products
Interface rate R_{Ca}		2.5 – 10 Gb/s	20 Gb/s 40 Gb/s pol mux	100 – 400 Gb/s	1.3 Tb/s [12]	2 – 6 Tb/s
Wavelengths		16	25 – 55	96 – 192	several hundred	16 – 66
Single mode	C_{Sys}	40 Gb/s	1 Tb/s	10 – 76 Tb/s	115 Tb/s [15]	32 – 400 Tb/s
	$C_{Sys} \times L$	14.4 Tb/s.km	150 Tb/s.km	up to 240 Pb/s.km	881 Pb/s.km [18]	500 Pb/s.km
	SE	0.0125 b/s/Hz	0.27 – 0.4 b/s/Hz	2 – 8 b/s/Hz (flex.)	17.3 b/s/Hz [17]	7 – 20
Cable ⁺ /SDM	C_{Sys}	20 Gb/s	-	288 Tb/s	10 Pb/s [16]	5 – 100 Pb/s
	$C_{Sys} \times L$	118 Tb/s.km	-	3,686 Pb/s.km	1,508 Pb/s.km [19]	30,000 Pb/s.km
Router blade		2 x 2.5 Gb/s	-	6 x 400 Gb/s	-	128 x 6 Tb/s
Router capacity		24 x 2.5 Gb/s	-	120 x 400 Gb/s	-	5,120 x 6 Tb/s

Futuro das comunicações ópticas

- **Teletransporte**

Qubit teleportation between non-neighbouring nodes in a quantum network

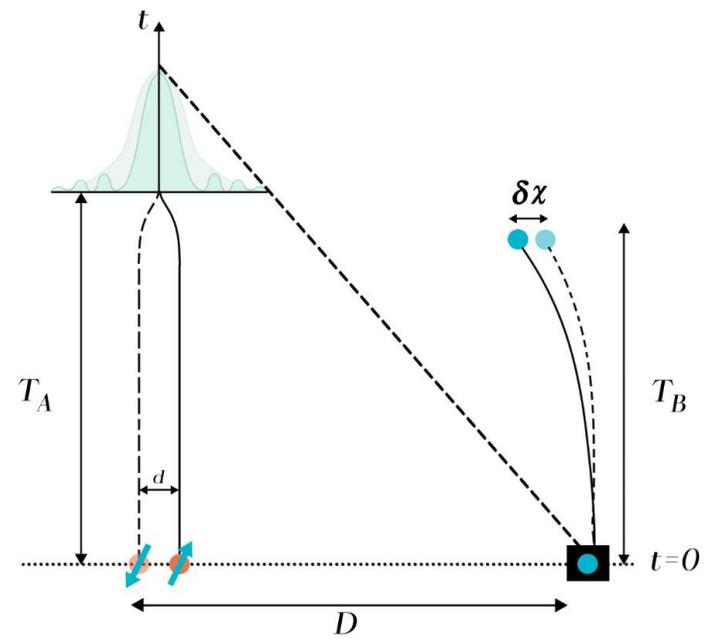


Futuro das comunicações ópticas

-

Efeito superluminar:

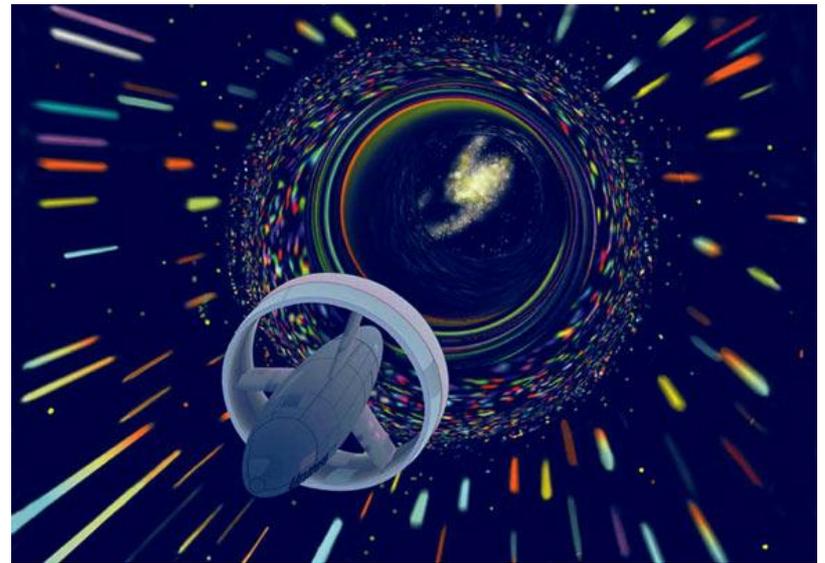
$$T_A, T_B < D/c$$



Spacetime diagram of the gedankenexperiment.

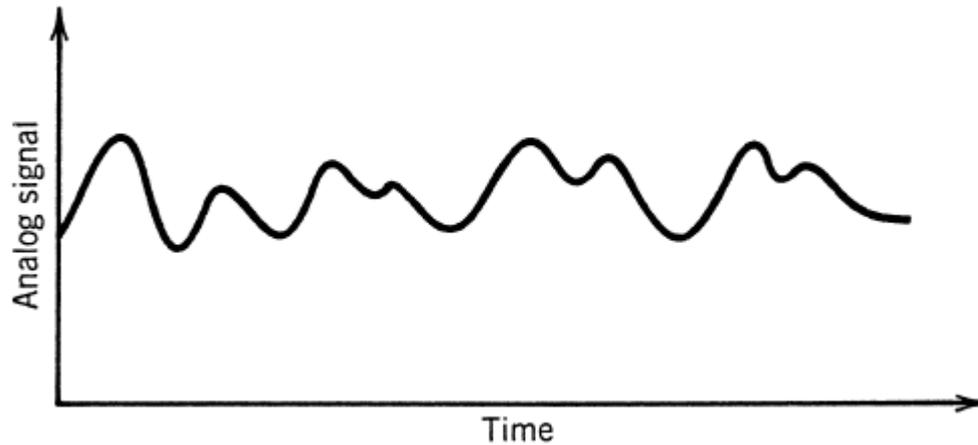
Superluminar

Faster-Than-Light Travel is Possible,
Theoretical Study Suggests

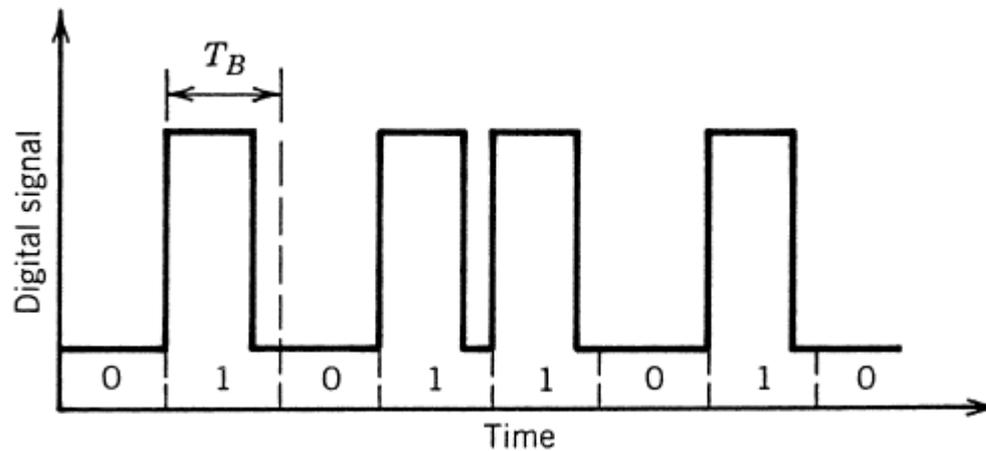


CONCEITOS BASICOS

Sinais analógicos e sinais digitais



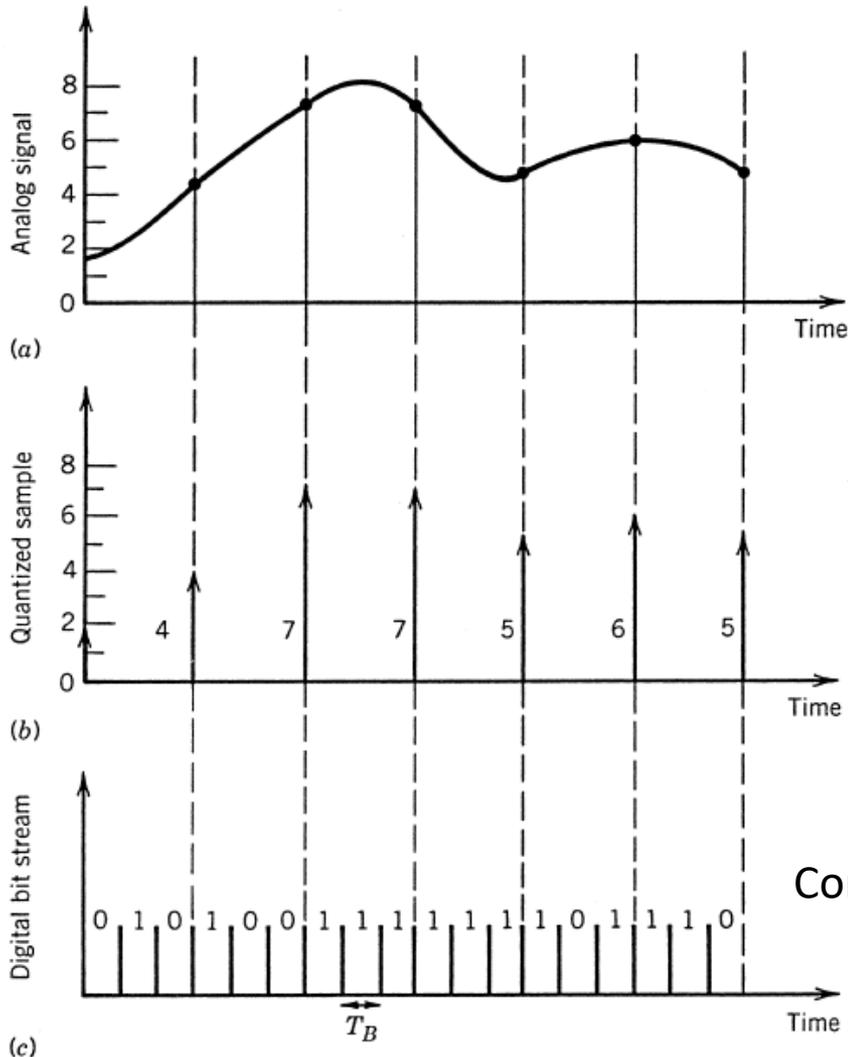
Sinal Analógico



Sinal digital

CONCEITOS BASICOS

Conversão análogo - digital



Teorema de amostragem (Nyquist)

$$f_s \geq 2\Delta f$$

Número de bits: m

Número de níveis: $M = 2^m$

Amplitude do sinal: $0 \leq A \leq A_{max}$

Amplitude do sinal de ruído: A_N



$$M > A_{max}/A_N$$

Razão Sinal/Ruído:

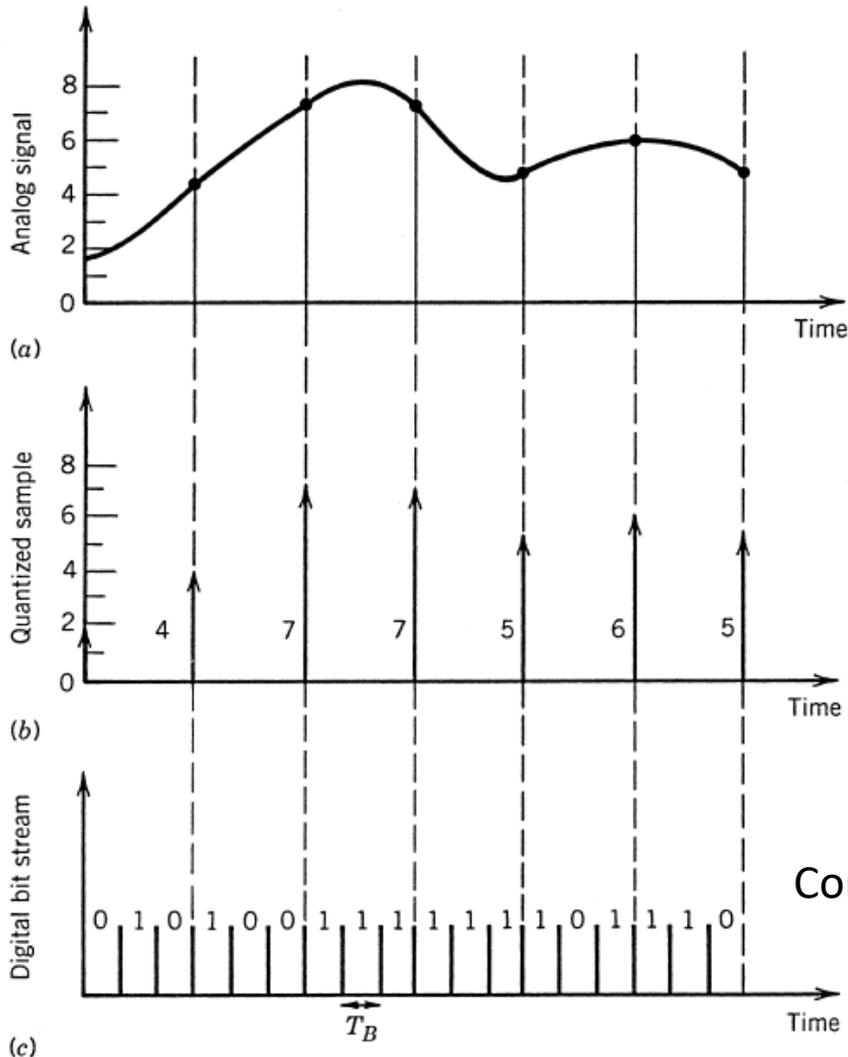
$$SNR = 20 \log \left(\frac{A_{max}}{A_N} \right) (dB)$$

Condição mínima para a taxa de transmissão de bits:

$$B \geq \left(\frac{\Delta f}{3} \right) SNR$$

CONCEITOS BASICOS

Conversão análogo - digital



Teorema de amostragem (Nyquist)

$$f_s \geq 2\Delta f$$

Número de bits: m

Número de níveis: $M = 2^m$

Amplitude do sinal: $0 \leq A \leq A_{max}$

Amplitude do sinal de ruído: A_N



$$M > A_{max}/A_N$$

Razão Sinal/Ruído:

$$SNR = 20 \log \left(\frac{A_{max}}{A_N} \right) (dB)$$

Condição mínima para a taxa de transmissão de bits:

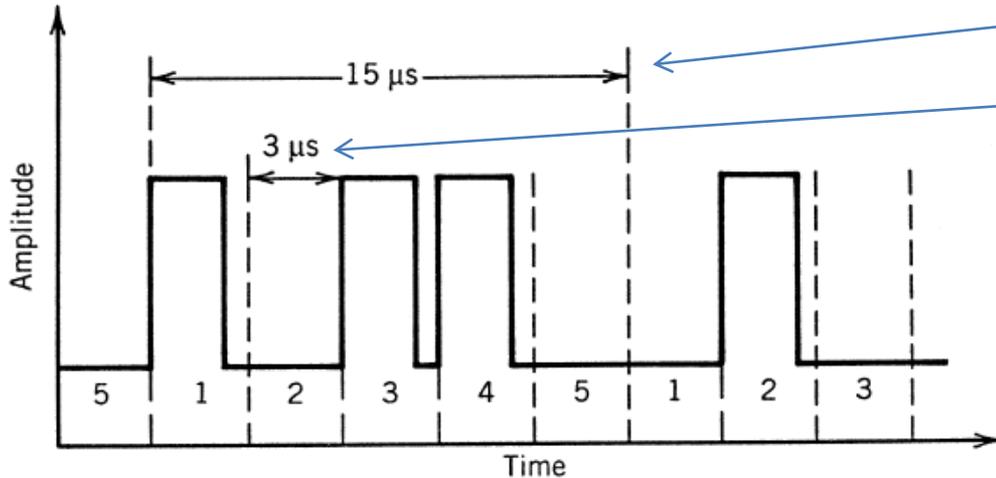
$$B \geq \left(\frac{\Delta f}{3} \right) SNR$$

Taxa de bits para “download de imagens

File Type	Estimated File Size	Average Download Time			
		1.5 mbps	3 mbps	6 mbps	15 mbps
 Webpage	1 MB	6 s	3 s	1 s	<1 s
 Song	5 MB	26 s	13 s	7 s	3 s
 SD Movie	2 GB	2.5 hrs	1 hr 15 min	44 m	20 m
 1080p HD Movie	12 GB	18 hrs	9 hrs	4.5 hrs	2 hrs

CONCEITOS BASICOS

Multiplexação por divisão de tempo: TDM



Janela temporal de todos os canais

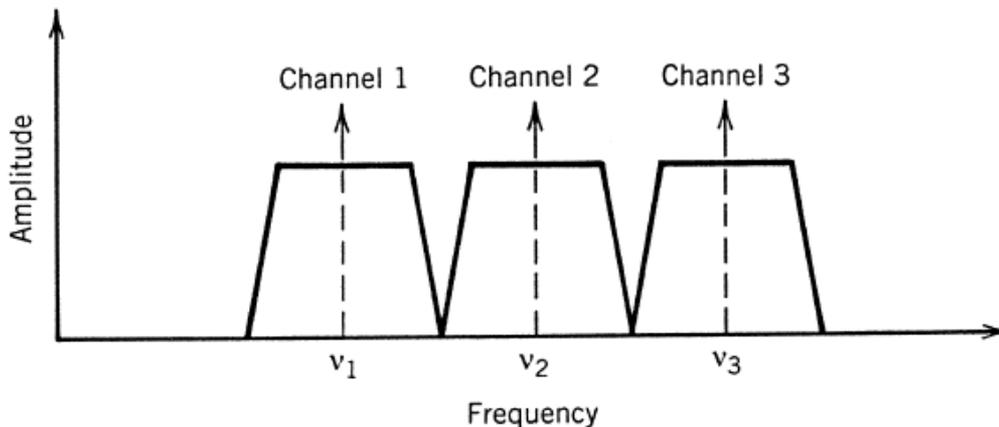
Janela temporal de cada canal

Taxa total de transmissão (B)

$$B_{Total} = NB_{canal}$$

Número de canais

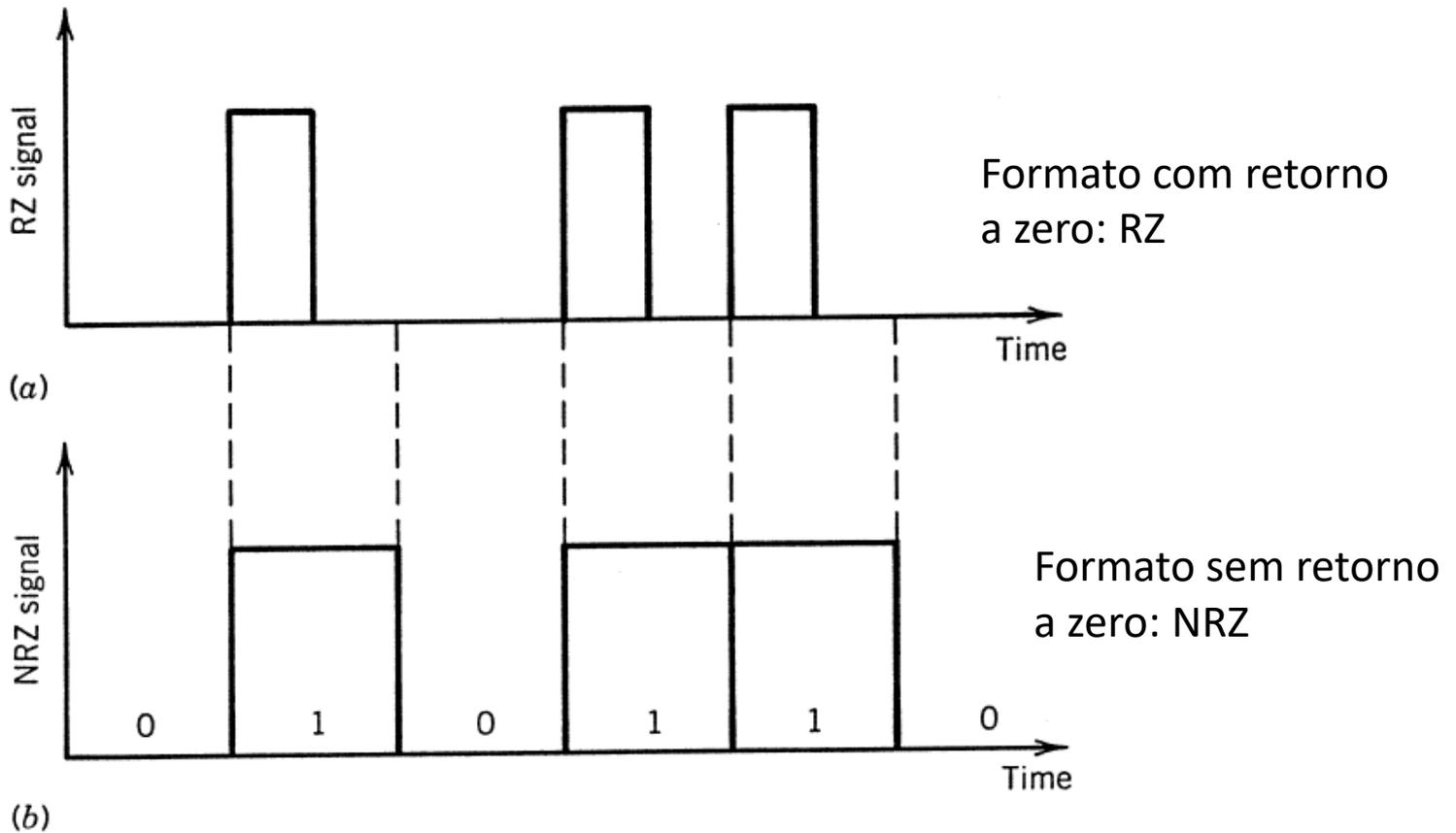
Multiplexação por divisão de frequência: FDM ou WDM



CONCEITOS BASICOS

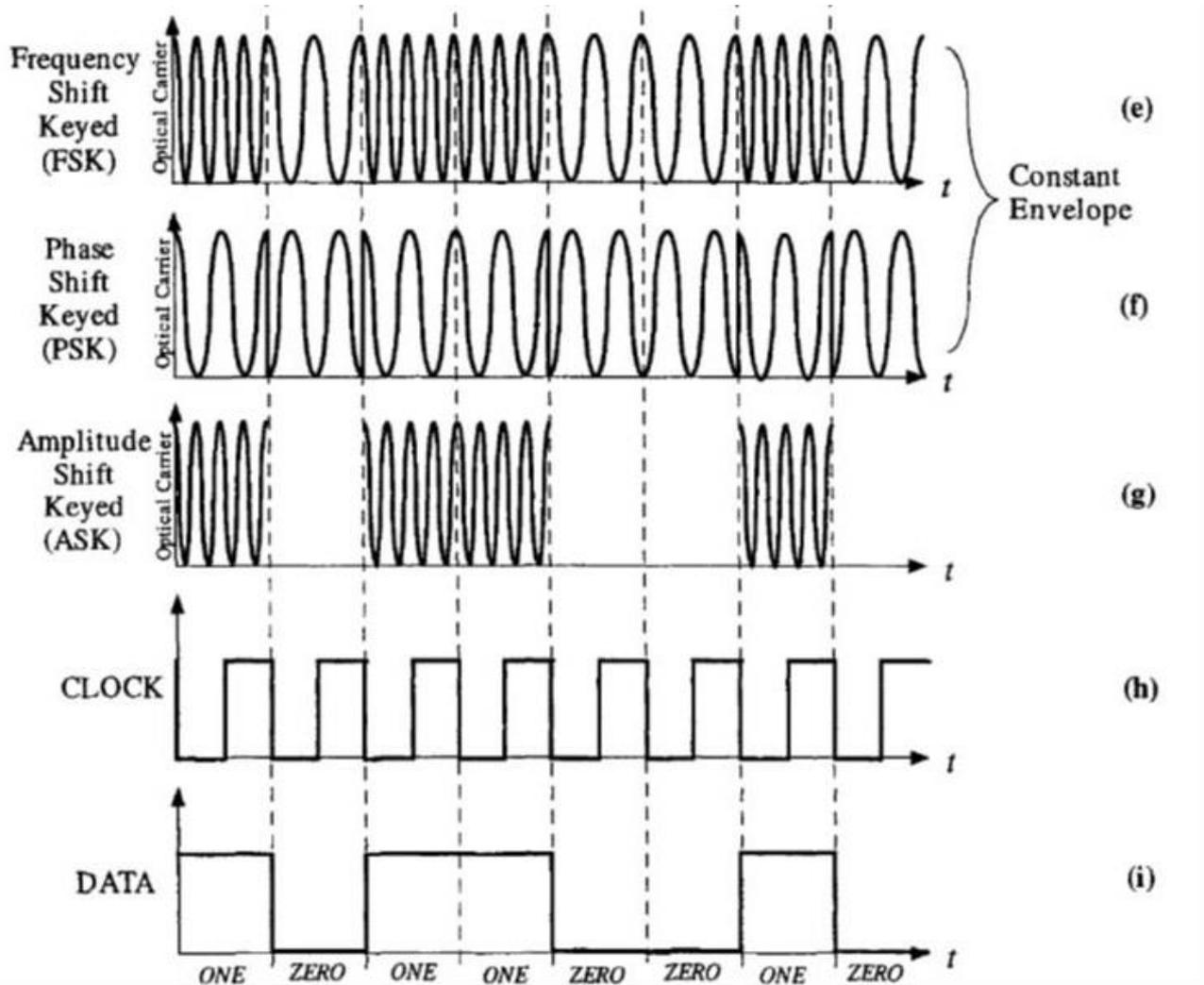
Formatos de modulação

Código: 010110



CONCEITOS BASICOS

Formatos de modulação



Campo elétrico da onda eletromagnética

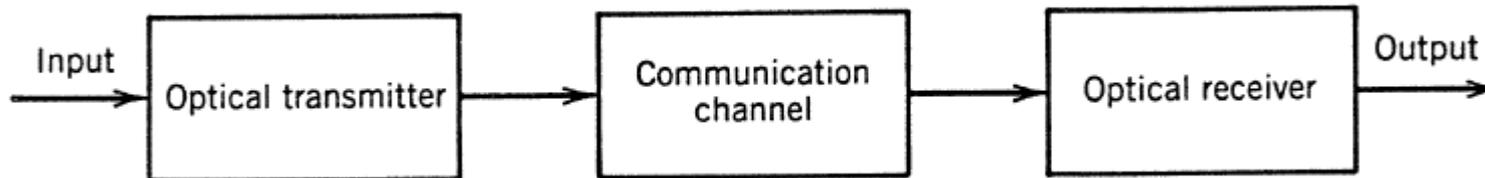
$$\mathbf{E}(t) = \hat{\mathbf{e}}A \cos(\omega_0 t + \phi)$$

CONCEITOS BASICOS

Componentes de um sistema óptico

.- Sistemas de comunicação guiada

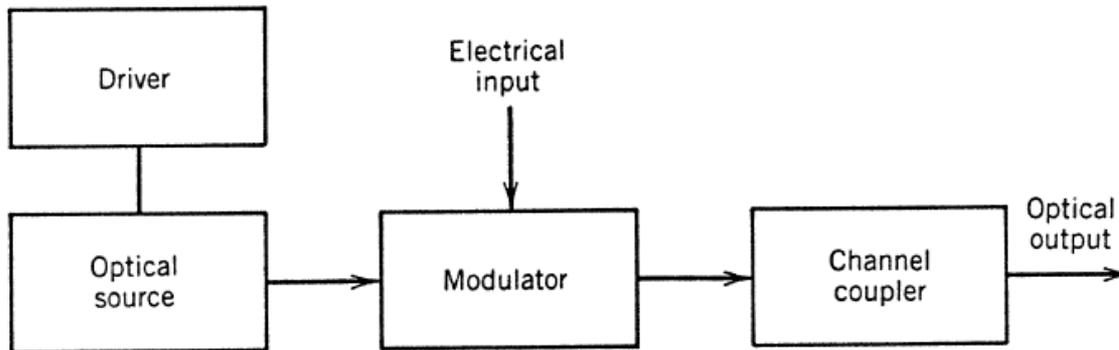
.- Sistemas de comunicação não guiada



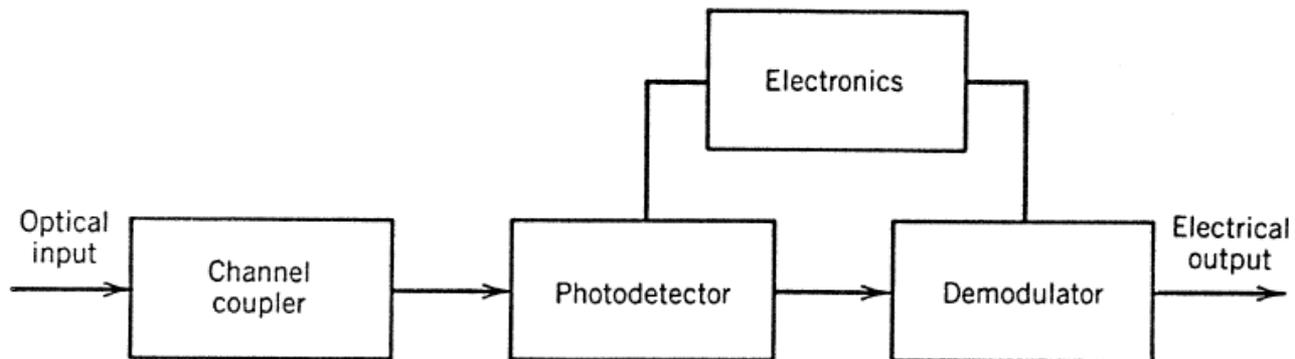
CONCEITOS BASICOS

Componentes de um sistema óptico

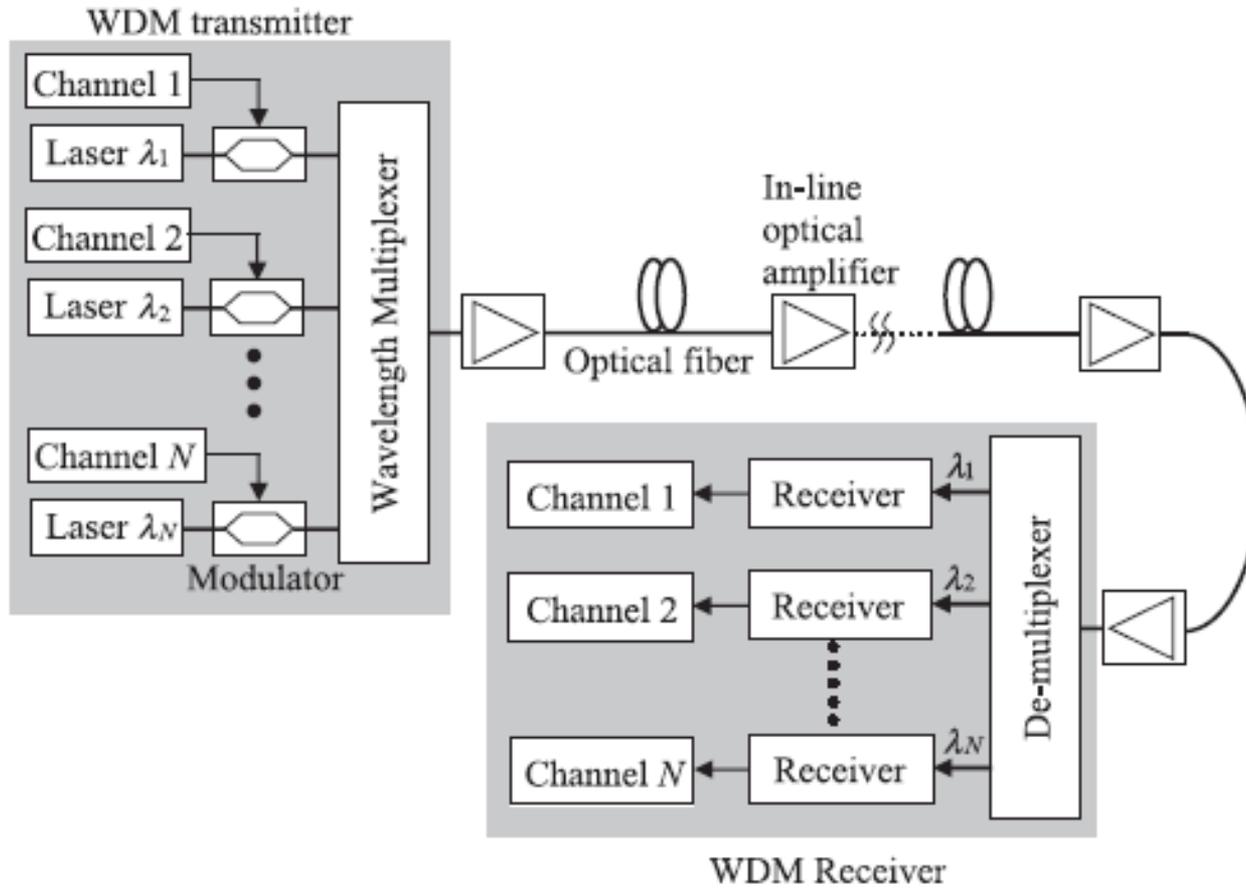
1.- Sistema transmissor



2.- Sistema receptor



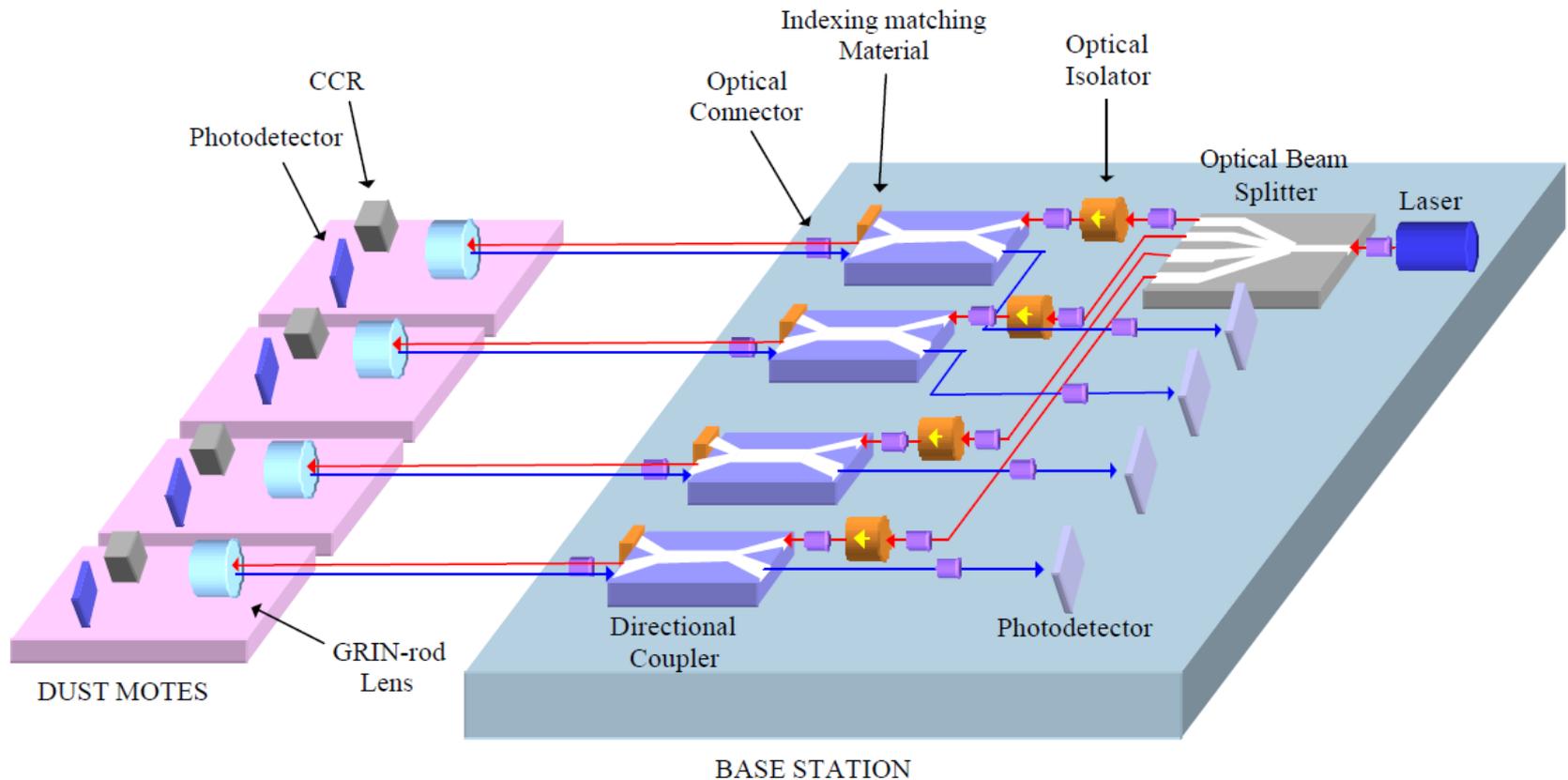
Sistema WDM



CONCEITOS BASICOS

Componentes de um sistema óptico

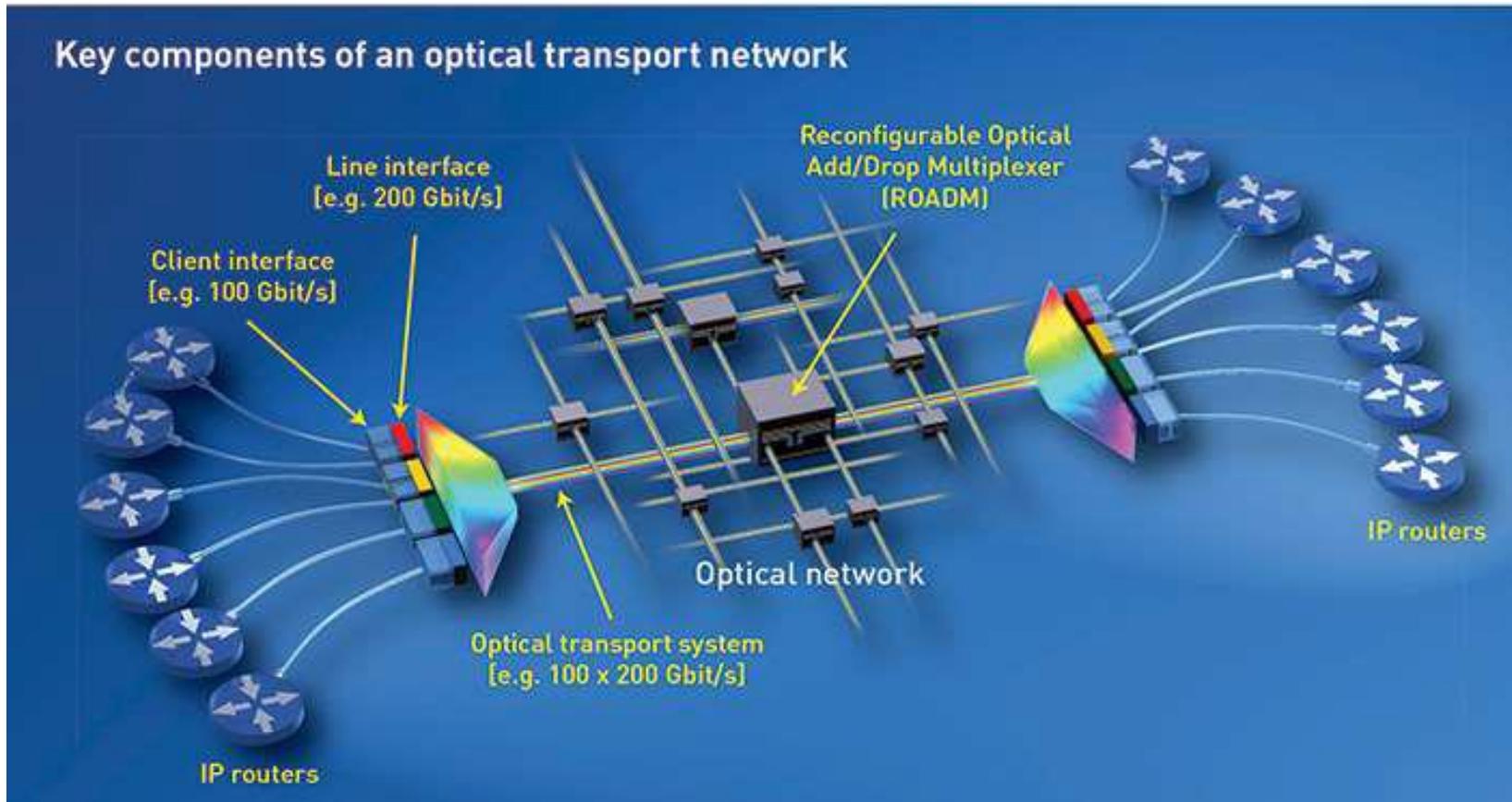
Rede de comunicação óptica bidirecional via fibra óptica



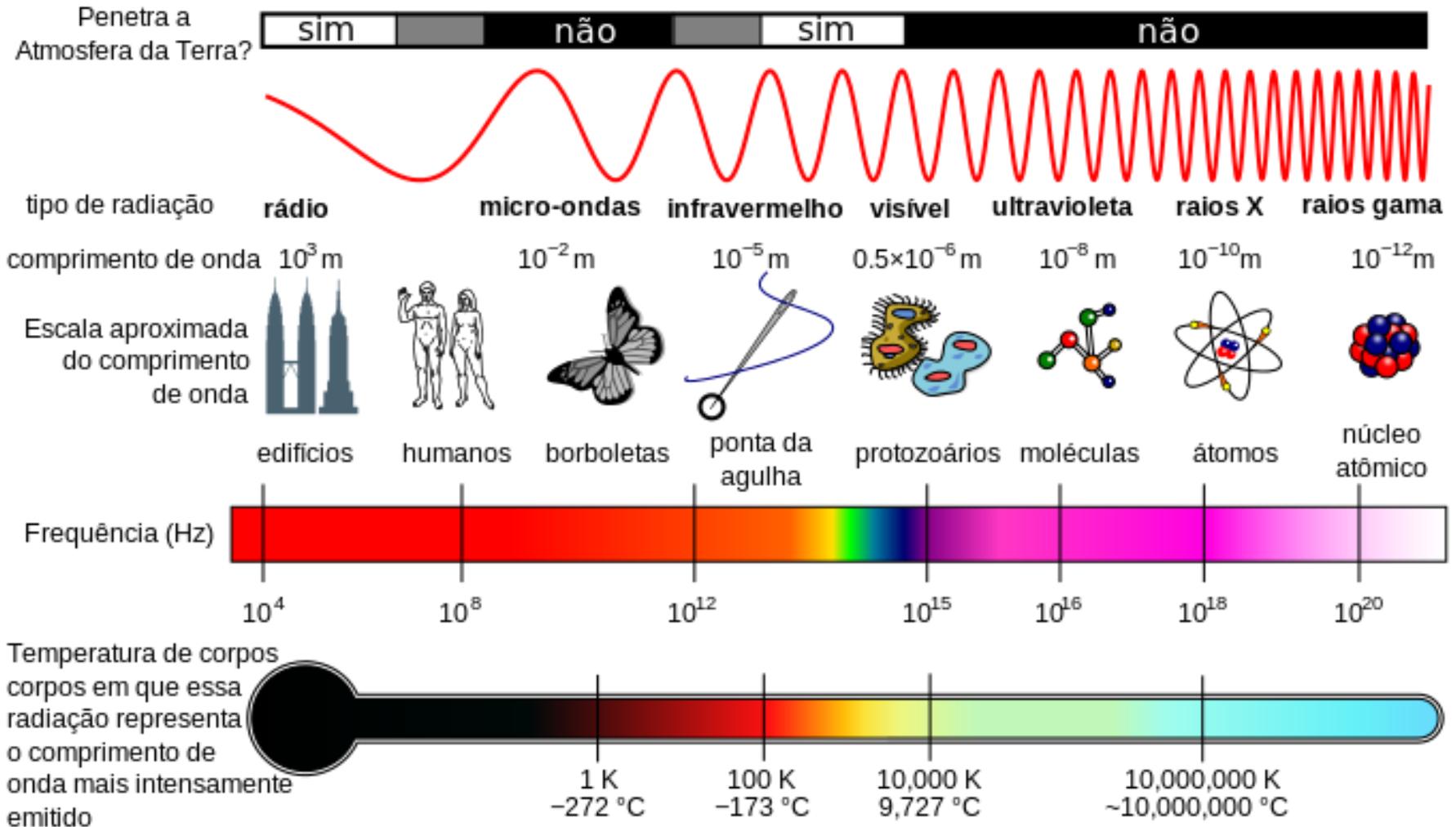
CONCEITOS BASICOS

Componentes de um sistema óptico

Redes locais

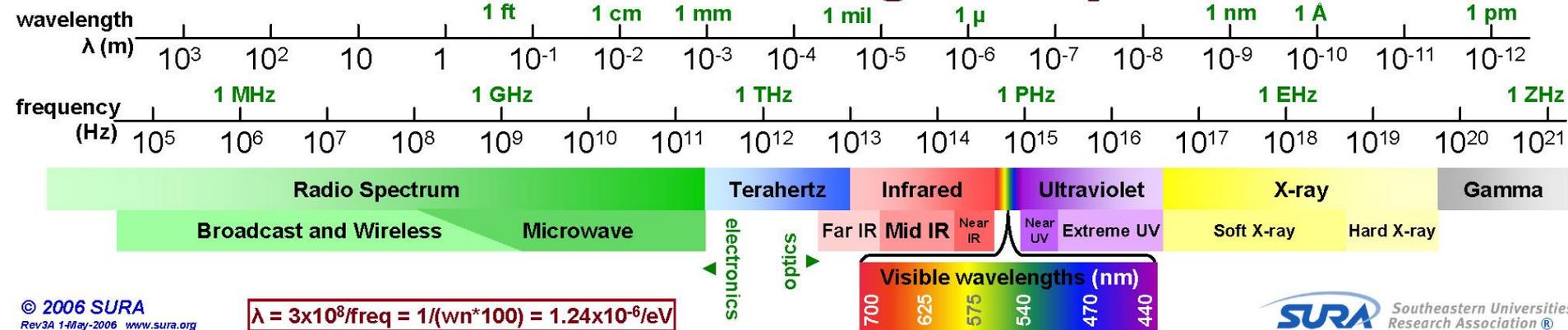


Espectro Eletromagnético



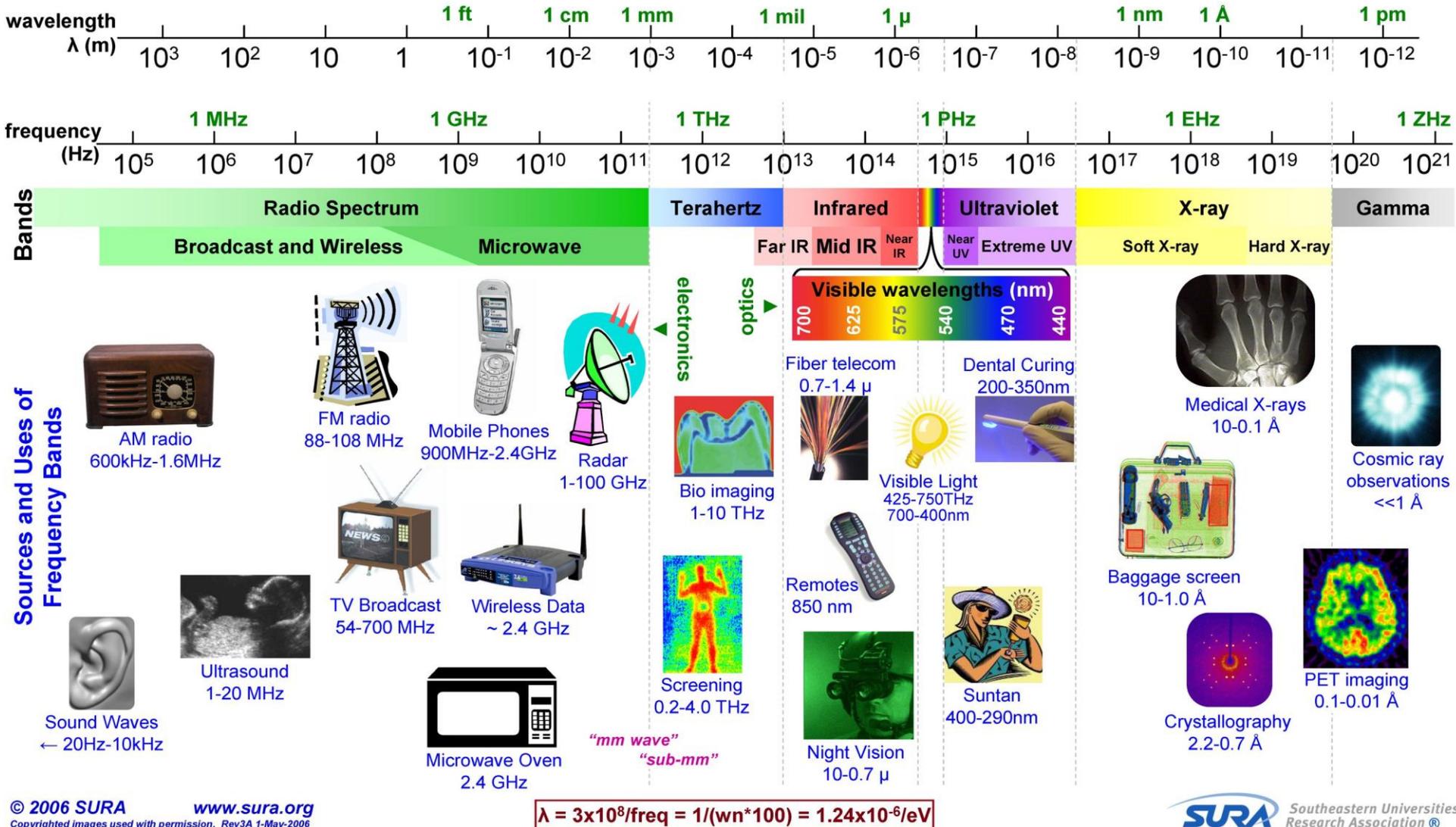
Tipos de Onda Eletromagnéticas

Chart of the Electromagnetic Spectrum



- Faixa elevada de comprimentos de onda e frequências
- Largura de banda de mais de 15 ordens de grandeza

Áreas de aplicação das ondas eletromagnéticas



Ondas Eletromagnéticas

Equações de Maxwell

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$$

$$\nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot D = \rho_{\text{ext}}$$

$$\nabla \cdot B = 0$$

Equações constitutivas: aproximação linear

$$P = \epsilon_0 \chi_e E$$

Vetor de polarização elétrica

$$D = \epsilon_0 E + P = \epsilon_0 \epsilon E$$

Vetor de deslocamento elétrico

$$M = \mu_0 \chi_M H$$

Vetor de polarização magnética

$$B = \mu_0 H + M = \mu_0 \mu H$$

Vetor de indução magnética

$$D = \epsilon_0 E + \epsilon_0 \chi_e E = \epsilon_0 (1 + \chi_e) E$$
$$B = \mu_0 H + \mu_0 \chi_M H = \mu_0 (1 + \chi_M) H$$

Permitividade elétrica do vácuo: $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \frac{F}{m}$

Permeabilidade magnética do vácuo: $\mu_0 = 12,566 \times 10^{-7} \frac{H}{m}$ (ou $\frac{N}{A^2}$)

Ondas Eletromagnéticas em meios homogêneos não dispersivos e sem perdas por absorção: Ondas planas

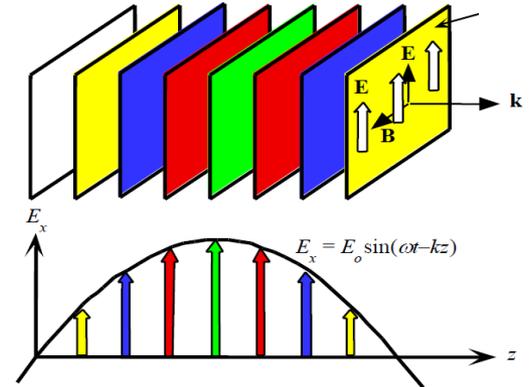
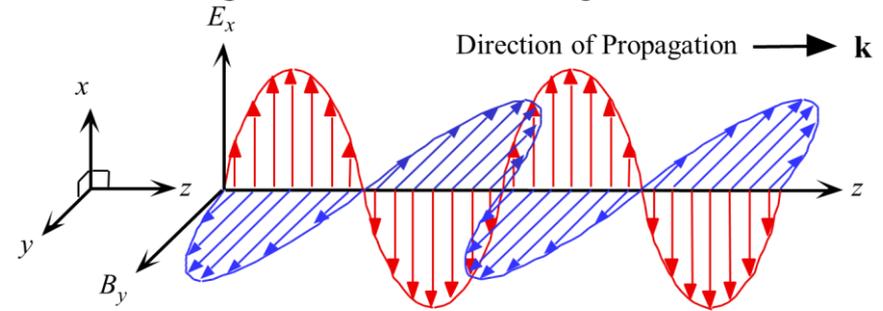
$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{i(\mathbf{K} \cdot \mathbf{r} - \omega t)}$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_0 e^{i(\mathbf{K} \cdot \mathbf{r} - \omega t)}$$

\mathbf{K} : Vetor de onda com modulo $K = \frac{2\pi}{\lambda} n$

λ : Comprimento de onda

ω : frequência angular = $2\pi f$



Ondas transversais

- Eq. de Maxwell: $\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H} \\ \nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}; \vec{D} = \epsilon_0 \epsilon \vec{E} \end{array} \right.$

- Transformada de Fourier

$$\frac{\partial}{\partial t} \rightarrow -i\omega, \quad \nabla \rightarrow i\mathbf{K}$$

$$\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} i\mathbf{K} \times \vec{E} = i\omega \mu_0 \mu \vec{H} \\ i\mathbf{K} \times \vec{H} = -i\omega \epsilon_0 \epsilon \vec{E} \end{array} \right. ; \quad \begin{array}{l} \mathbf{K} = K \hat{e}_z \\ \vec{E} = E \hat{e}_E \\ \vec{H} = H \hat{e}_H \end{array}$$

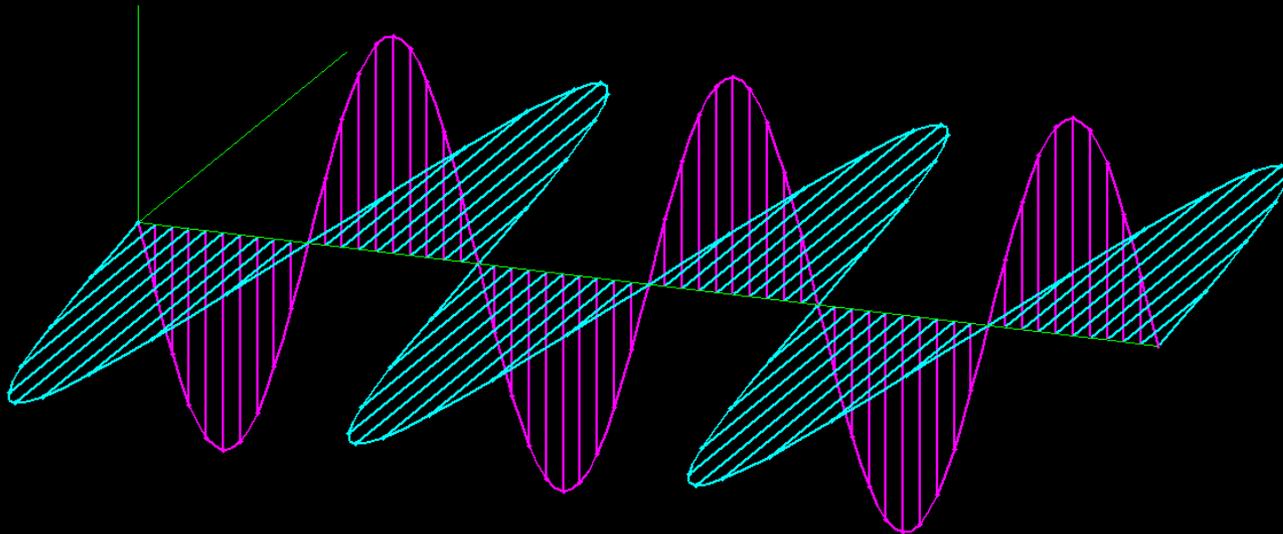
$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{e}_K \times \hat{e}_E = \hat{e}_H \\ \hat{e}_K \times \hat{e}_H = -\hat{e}_E \end{array} \right. \Rightarrow \hat{e}_E \times \hat{e}_H = \hat{e}_K \quad \left(\vec{H} = \frac{\omega \epsilon_0 \epsilon}{K} \vec{E} \right)$$

$$\hat{e}_E \times \hat{e}_H = \hat{e}_K, \quad H = \sqrt{\frac{\epsilon_0 \epsilon}{\mu_0 \mu}} E$$

Ondas eletromagnéticas

Electromagnetic field propagation (planar waves)

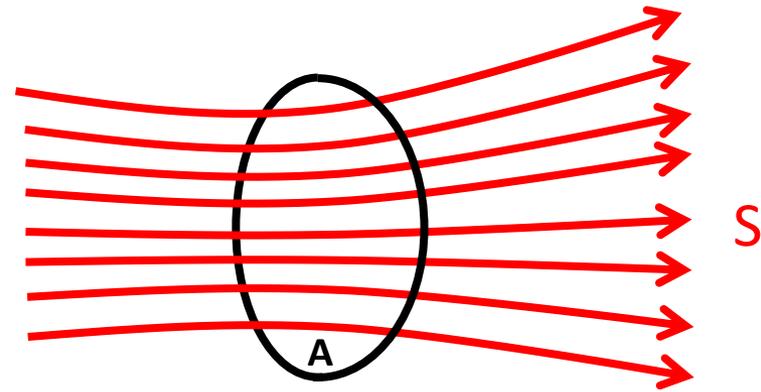
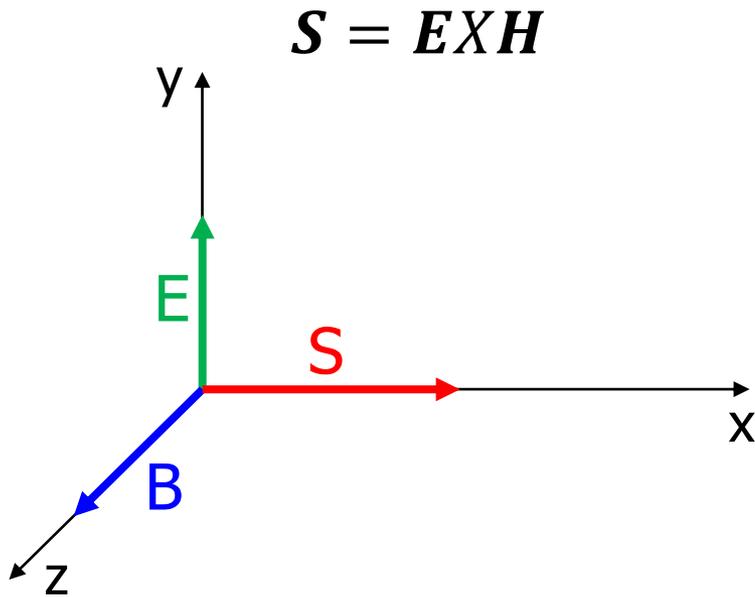
— Electric field
— Magnetic field



Intensidade ou Luminância das ondas eletromagnéticas

Vetor de Poynting

Representa o vetor do fluxo de energia por unidade de tempo e esta dado em [Watts/m²]

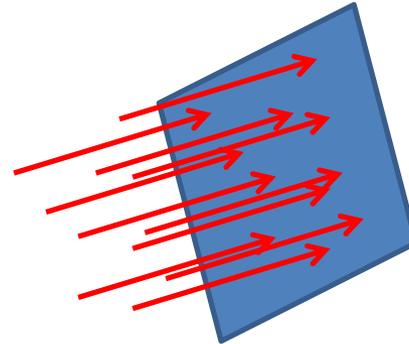


Intensidade ou Luminância das ondas eletromagnéticas

$$I = \langle |S| \rangle_t = \frac{1}{T} \int_0^T |S| dt = \frac{1}{T} \int_0^T |EXH| dt$$

$$I = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon_0 \epsilon}{\mu_0 \mu}} |E_0|^2 \quad \left[\frac{\text{Watts}}{\text{m}^2} \right]$$

Área do detector

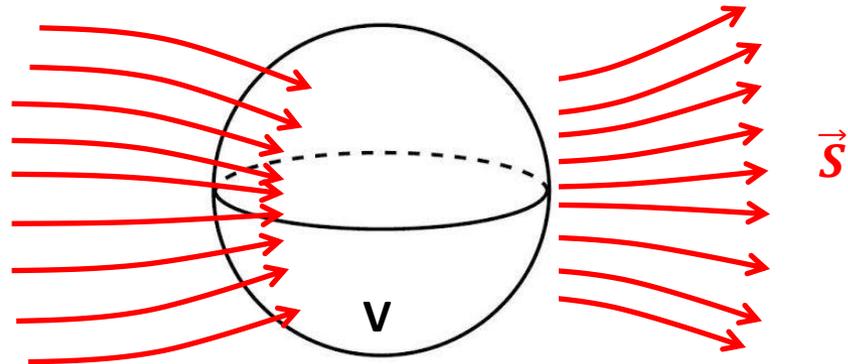
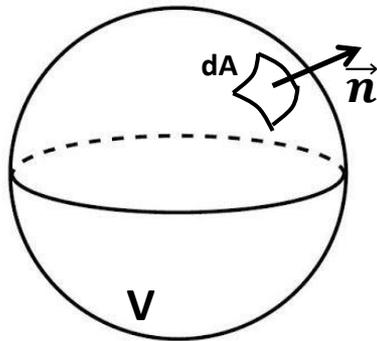


Densidade de energia da onda eletromagnética

Energia eletromagnética por unidade de tempo emitida desde um volume V com superfície fechada A

$$\frac{\text{Energia}}{\text{unidade de tempo}} = \oint_A \vec{S} \cdot d\vec{A} = \oint_A \vec{S} \cdot \vec{n} dA = \oint_A \vec{E} \times \vec{H} \cdot \vec{n} dA$$

$$\frac{\text{Energia}}{\text{unidade de tempo}} = \int_V (\vec{E} \cdot \nabla \times \vec{H} - \vec{H} \cdot \nabla \times \vec{E}) dv$$



Densidade de energia:

$$u = \frac{\epsilon_0 \epsilon}{2} |E|^2 + \frac{\mu_0 \mu}{2} |H|^2 \quad \left[\frac{\text{Joules}}{\text{m}^3} \right] \quad = \epsilon_0 \epsilon |E|^2 (= \mu_0 \mu |H|^2)$$

Equação de Helmholtz

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$



$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -\mu_0 \mu \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \mathbf{H}) = -\mu_0 \mu \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right)$$

$$\nabla(\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E} = -\mu_0 \mu \epsilon_0 \epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2}$$

materialis homogêneas e sem carga elétrica

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 0 \Rightarrow \epsilon_0 \epsilon \nabla \cdot \mathbf{E} = 0$$

$$\Rightarrow -\nabla^2 \mathbf{E} + \mu_0 \epsilon_0 \mu \epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0$$

considerando ondas harmônicas no tempo

$$e^{-i\omega t}$$

$$\Rightarrow \nabla^2 \mathbf{E} + \mu_0 \epsilon_0 \omega^2 \mu \epsilon \mathbf{E} = 0$$

Velocidade da luz no vácuo $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 2,997925 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

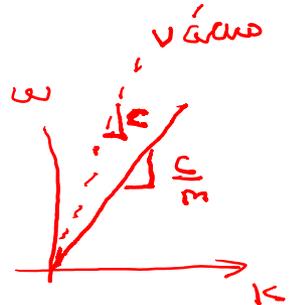
Índice de refração do meio: $n = \sqrt{\epsilon \mu}$

Equação de Helmholtz: $\nabla^2 \mathbf{E} + K^2 \mathbf{E} = 0$

$$\Rightarrow K = K_0 n = \frac{2\pi}{\lambda} n$$

$$\text{ou } \omega = \frac{2\pi}{\lambda} c$$

$$K_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$$



Atenuação das ondas eletromagnéticas

Perda na Fibra óptica de Comprimento "L"

$$P_L = P_0 \exp(-\alpha L)$$

α : coeficiente de absorção (cm^{-1})

em dB:

$$z=0, P_0(\text{dB}) = 10 \log P_0$$

$$z=L, P_L(\text{dB}) = 10 \log P_L$$

$$\text{Perda: } P_0(\text{dB}) - P_L(\text{dB}) = 10 \log \frac{P_0}{P_L}$$

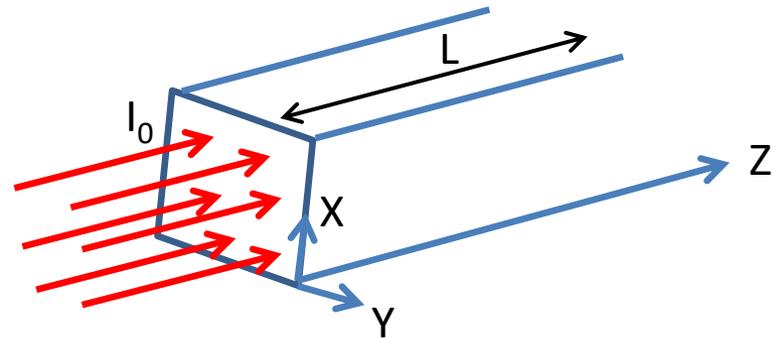
$$\alpha_{\text{dB}} L = 10 \log (P_0/P_L)$$

$$\alpha_{\text{dB}} = \frac{1}{L} \log (P_0/P_L) \quad (\text{dB/km})$$

Perdas em unidades de dB

$$P_L = P_0 10^{\left(-\frac{\alpha_{\text{dB}} L}{10}\right)}$$

α_{dB} : coeficiente de absorção (dB/Km)



Ondas Eletromagnéticas

Equações de Maxwell

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t,$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \partial \mathbf{D} / \partial t,$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 0,$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0,$$

Equações constitutivas

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P},$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} + \mathbf{M},$$

Equação de onda para meios

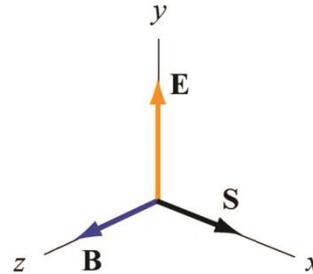
Homogêneos:

(Equação de Helmholtz)

$$\nabla^2 \tilde{\mathbf{E}} + n^2(\omega) k_0^2 \tilde{\mathbf{E}} = 0,$$

$$k_0 = \omega / c = 2\pi / \lambda$$

Vetor de Poynting: Potência transportada pela onda ou densidade do fluxo de energia.



$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B} = \vec{E} \times \vec{H} \quad [\text{Watts/m}^2]$$

Densidade de energia eletromagnética

$$u = \frac{1}{2} \epsilon \epsilon_0 |E|^2 + \frac{1}{2} \mu \mu_0 |H|^2 = \epsilon \epsilon_0 |E|^2 \quad \left[\frac{\text{Joules}}{\text{m}^3} \right]$$

Equação de continuidade:

$$\nabla \cdot \vec{S} + \frac{\partial u}{\partial t} = 0$$

Intensidade: media temporal do modulo do vetor de Poynting

$$I = \langle S \rangle_t = \frac{1}{c \mu \mu_0} \overline{|E|^2} = \frac{1}{2 c \mu \mu_0} E_P^2 \quad \left[\frac{\text{Watts}}{\text{m}^2} \right]$$

Considerações de potência e energia

Energia de um fóton:

$$E = h\nu \text{ (Joules)}$$

Constante de Planck: $h = 6,6262 \times 10^{-34} \text{ Js}$
 ν : frequência da luz

Taxa de fótons no receptor:

$$r = \frac{P}{h\nu} \text{ (fótons/s)}$$

P: potencia em watts

Número de fótons por bit:

$$n_p = \frac{r}{B} = \frac{P}{h\nu B}$$

B: Taxa de transmissão de dados (bit/segundo)

Constantes importantes

Table of constants:

Constant	Name	Value	Unit
k	Boltzmann's constant	1.28×10^{-23}	J/K
h	Planck's constant	6.62×10^{-34}	J s
q	Electron charge	1.6023×10^{-19}	C
c	Speed of light in free space	2.99792×10^8	m/s
T	Absolute temperature	$273 \text{ K} = 0^\circ \text{C}$	K
ϵ_0	Permittivity in free space	8.85×10^{-12}	F/m
μ_0	Permeability in free space	12.566×10^{-7}	N/A ²

Conversion between units:

Unit 1	Unit 2	Conversion
Electron volt [eV]	Energy [J]	$1 \text{ eV} = 1.6023 \times 10^{-19} \text{ J}$
Free space wavelength (λ [m])	Frequency (f [Hz])	$f = c/\lambda$
Attenuation (α [Neper/m])	α_{dB} [dB/km]	$\alpha_{\text{dB}} = 4.343 \times 10^3 \alpha$
Chromatic dispersion β_2 [s ² /m]	D [ps/nm/km]	$D = -(2\pi c/\lambda^2)\beta_2 \times 10^6$