



EPUSP

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - EPUSP
Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas - PEA
Av. Prof. Luciano Gualberto, Travessa 3, No.158
Butantã - São Paulo - SP
CEP: 05508-900

PEA-5716

COMPONENTES E SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO E SENSOREAMENTO A FIBRAS ÓPTICAS

Prof. Dr. Josemir Coelho Santos

Contatos: josemir@pea.usp.br

(011) 3091-5222/ 3091-5155

Horário : 14 h às 17 h (4ª Feira)

OBJETIVO:

Atualizar os engenheiros da área elétrica com conceitos sobre:

- Fibras Ópticas;
- Sistemas de Comunicação a Fibras Ópticas;
- Sensores Ópticos e Sensores a Fibras Ópticas;
- Aplicações de Fibras Ópticas em Sistemas Elétricos de Potência (SEP).

Programação do Curso

- **Dia 14/09**

- APRESENTAÇÃO DO CURSO E INTRODUÇÃO A SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO A FIBRAS ÓPTICAS.

- **Dia 21/09**

- GUIAS ÓPTICOS;
- PROPAGAÇÃO EM FIBRAS ÓPTICAS.

- **Dia 28/09**

- TECNOLOGIAS DE FABRICAÇÃO DE FIBRAS ÓPTICAS;
- CABOS ÓPTICOS, EMENDAS E CONECTORES.

- **Dia 05/10**

- EMISSORES E DETECTORES ÓPTICOS;
- SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO A FIBRAS ÓPTICAS (1ª parte).

Programação do Curso (cont.)

- **Dia 19/10**

- SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO A FIBRAS ÓPTICAS (2ª parte);
- CWDM / WDM / DWDM;
- EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DE FIBRAS ÓPTICAS À MONITORAÇÃO, SUPERVISÃO E CONTROLE DOS SEPs.

- **Dia 26/10**

- SENSORIAMENTO ÓPTICO (conceitos);
- SENSORES ÓPTICOS APLICÁVEIS AOS SEPs.

- **Dia 09/11**

- ÓPTICA DE JONES;
- PROJETO DE SENSORES ÓPTICOS.

- **Dia 16/11**

- SENSORES ÓPTICOS DE TENSÃO (efeitos eletro-ópticos, Kerr e Pockels).

Programação do Curso (cont.)

- **Dia 23/11**
 - SENSORES ÓPTICOS DE CORRENTE (efeitos Magnetoestrutivo e Magneto-óptico).
- **Dia 30/11**
 - SENSORES ÓPTICOS DE TENSÃO E CORRENTE COMO TRANSFORMADORES DE INSTRUMENTAÇÃO ESPECIAIS;
 - EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DE TRANSFORMADORES ÓPTICOS DE TENSÃO E CORRENTE EM SEP.
- **Dia 07/12**
 - EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DE SENSORES ÓPTICOS.
- **Dia 14/12**
 - AVALIAÇÃO DO CURSO.
 - FORMAS DE AVALIAÇÃO: SEMINÁRIOS, TRABALHOS E ATIVIDADE AVALIATIVA.

Breve Histórico

EVOLUÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO

CONDUZIU A

- Geração em níveis de potência mais elevados;
- Aproveitamentos cada vez mais distantes;
- Transmissão em elevados níveis de tensão e de corrente;
- Elevação dos níveis de ruído eletromagnético gerados na GTD;
- Sistemas de tamanho e complexidade operativa crescentes.

QUE EXIGIU

- Dispositivos de medição (convencionais) para maior isolamento (maiores e mais caros) e de maior precisão;
- Proteção mais precisa, flexível e confiável (respostas mais rápidas);
- Sistemas de intra e intercomunicação mais seguros e insensíveis a interferência;
- Sistemas de monitoração e supervisão mais complexos e “inteligentes”.

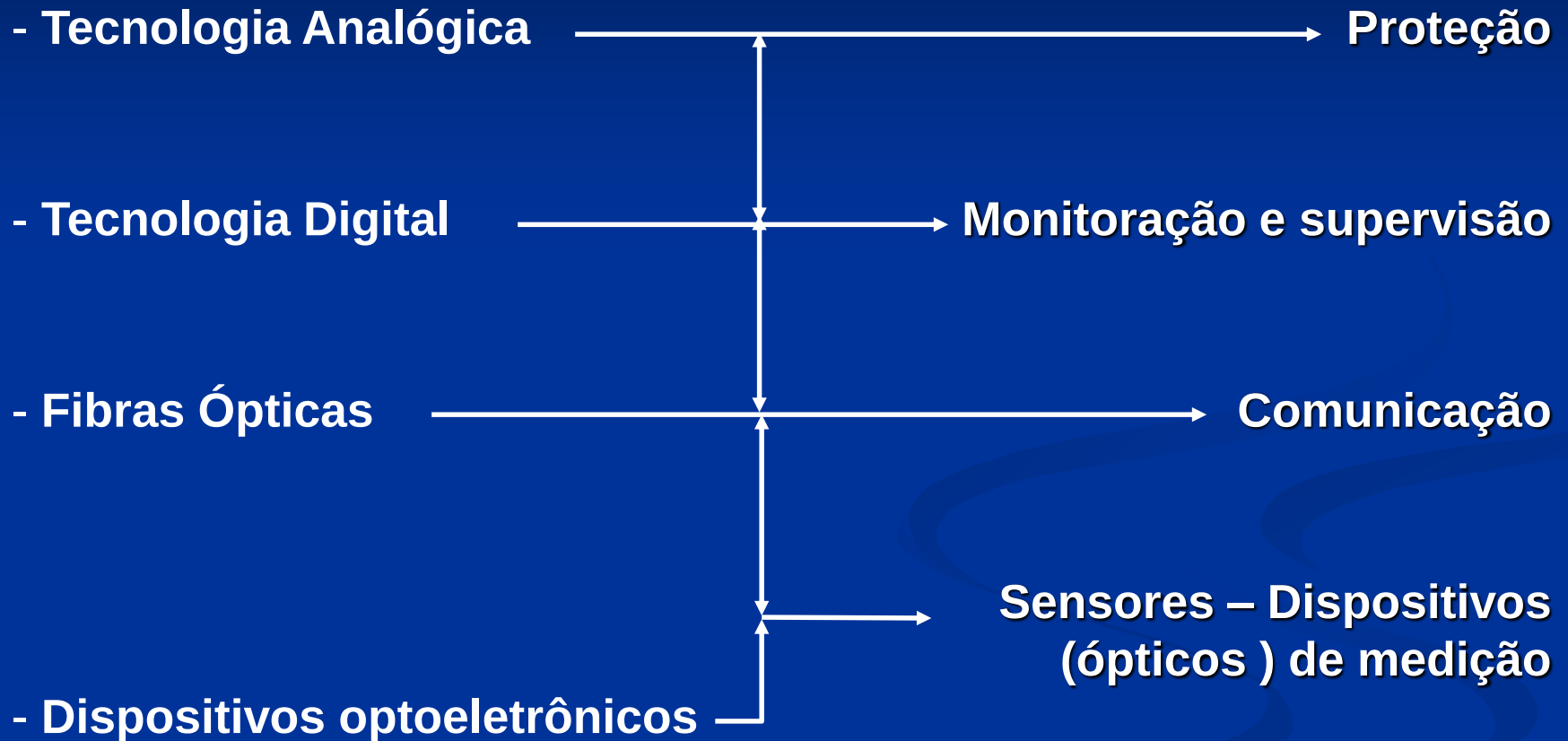
Por outro lado

EVOLUÇÃO DA ELETRÔNICA

Conduziu ao desenvolvimento de $\Rightarrow$ Que contribuiu para

- Tecnologia analógica $\Rightarrow$ Releamento Estático
- Tecnologia digital $\Rightarrow$
 - Monitoração e Controle Operativo do Sistema
 - Comunicação digital de dados
 - Releamento Digital e Proteção
- Dispositivos Optoeletrônicos $\Rightarrow$
 - Fontes (LED e LD) e
 - Detectores (PIN e APD)
- Telecomunicações (enlaces) $\Rightarrow$ Telemática, monitoração e supervisão

Resumindo



Porque usar Sistemas de Comunicação e Sensoriamento a Fibras Ópticas

- **Possibilidade de usos múltiplos do enlace óptico;**
- **Dimensões (6 x menor) e peso reduzidos (66 x menor) quando comparados aos cabos convencionais – armazenamento, transporte, manuseio e instalação;**
- **Isolação elétrica (não há risco de choque elétrico) com completo desacoplamento elétrico entre sistemas comunicados ou medidos e de medição;**
- **Intermodulação ou diafonia (“crosstalk”) praticamente nula;**
- **Imunidade a ruídos externos e interferências eletromagnéticas;**

Porque usar Sistemas de Comunicação e Sensoriamento a Fibras Ópticas

- **Compatibilidade inerente com tecnologias de telemetria e telecomunicação comerciais a fibras ópticas pré-existentes;**
- **Capacidade de transmissão de dados e informações elevada (ampla faixa de resposta em frequência);**
- **Transmissão com baixas perdas;**
- **Flexibilidade na capacidade de transmissão;**
- **Custos reduzidos.**

Evolução dos Sistemas de Comunicação

Comunicação Óptica:

"Nasce com a luz na aurora dos Tempos" (Santos, J. C.)

Conceito fundamental : Luz como portadora de informação

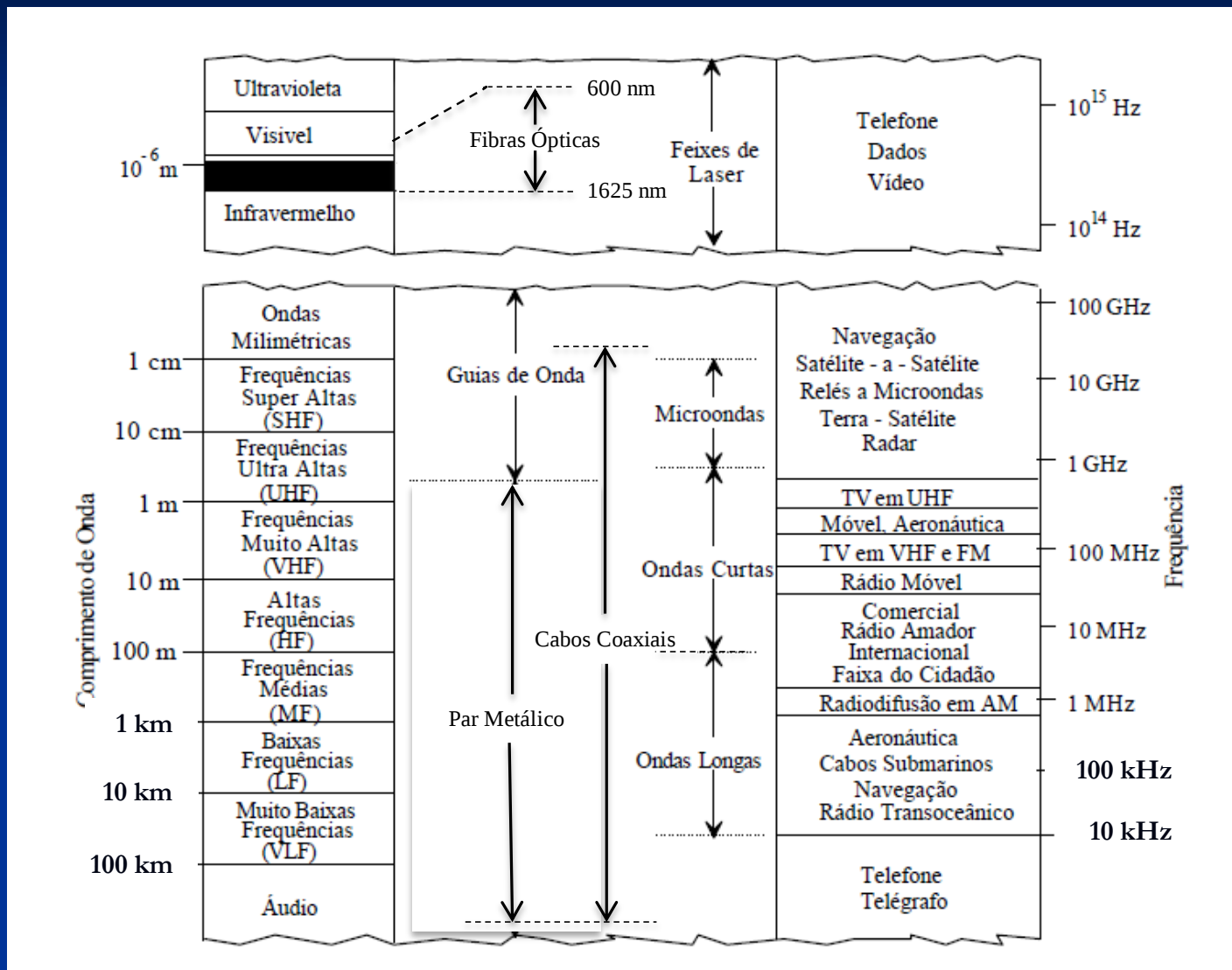
- Ésquilo em XIII a.C. - informa Argos da queda de Tróia por cadeia de sinais de fogo;
- Políbio em II a.C. - Códigos de sinais de fogo para todo alfabeto grego (dois dígitos + 5 níveis);
- Snell em 1621 – Lei da Refração;
- Christian Huygens descobriu a polarização da luz em 1678 e em 1690 formulou a teoria ondulatória da luz;

Evolução dos Meios Ópticos de Comunicação

Conceito fundamental : Luz como portadora de informação

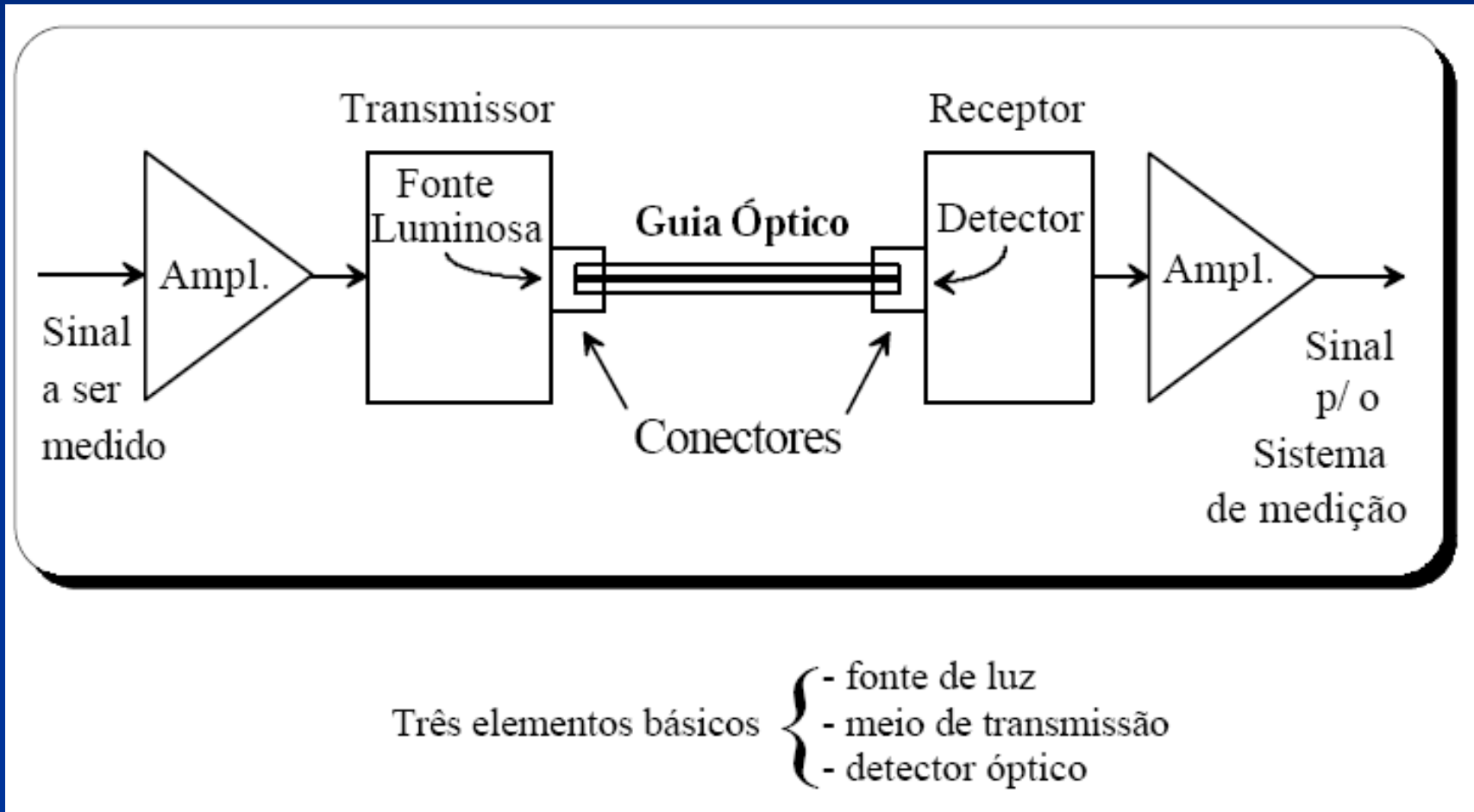
- Claude Chappe no sec. XVII - Telégrafo óptico (lunetas), ligando Paris a Strasbourg (423 km);
- Fizeau em 1849 - novo método para medição da velocidade da luz (313240 km/s); 
- John Tyndall em 1870 - observou em laboratório o fenômeno da guiagem de um feixe de luz através de múltiplas reflexões num fluxo laminar de água; 
- Graham Bell 1880 patenteia o photofone e inaugura a Era das comunicações optoelétricas; 
- Heinrich Hertz em 1887 - comunicações elétricas ganharam o espaço aberto como meio de propagação;

Espectro eletromagnético com comunicações e exemplos de aplicações



Sistemas de Comunicação a Fibras Ópticas

Concepção geral: Luz como portadora de sinal



- 1910 - Hondros e Debye - Desenvolvem a teoria de guias de onda dielétricos.

$$\alpha = 10 \cdot \log \left(\frac{P_e}{P_s} \right) \cdot \frac{1}{L} \left[\frac{\text{dB}}{\text{km}} \right]$$

Nesta época, $\alpha = 2000$ a 3000 dB/km;

- Seguem-se 40 anos de pesquisas em guias ópticos em vidro recoberto, buscando reduzir a atenuação;
- 1952 - Narinder Singh Kapany - inventou as fibras ópticas com casca;
- 1957 - Gordon Gould - primeiro cientista a produzir a teoria de um LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation);
- 1960 - Theodore Harold Maiman – criou e operou o primeiro LASER, sendo uma fonte luminosa potente;
- 1962 - Nick Holonyak Jr. - criou o primeiro LED (Light Emitting Diode);
- 1966 - C.K.Kao e G. A. Hockhan - demonstram:
 - 1- atenuação nos guias não depende do vidro, mas de suas impurezas;
 - 2- p/ atenuação $\alpha < 20$ dB/km a fibra fica competitiva com cabos coaxiais.

- 1968 - Du Pont - cria as POFs - Fibras Ópticas Plásticas (Plastic Optical Fiber), desenvolvidas pela com núcleo de Polimetilmetacrilato (PMMA), índice degrau, $\alpha = 500$ dB/km para $\lambda = 650$ nm;
- 1970 - Corning Glass Works - fibra óptica com $\alpha < 20$ dB/km na primeira janela;
- 1975 - Corning Glass Company - fibras ópticas com $\alpha < 5$ dB/km na segunda janela;
- 1977 – Chicago (USA) - primeiro sistema de fibras ópticas comercial do mundo através de um cabo multifibras;
- 1980 - Corning Glass Company – fabricam-se fibras com $\alpha < 3$ dB/km (850 nm) e $\alpha < 0,5$ dB/km (1550 nm);
- 1982 - Rio de Janeiro - primeiro Experimento de Comunicações Ópticas (ECO-I) em campo;
- 1984 - ABC X-Tal - inicia a produção de fibras ópticas com tecnologia nacional do CPqD (850 nm);

- 1985 - Sumitomo Electric Industries - fibras ópticas monomodo com dispersão deslocada - DSF (Dispersion Shifted Fiber);
- 1988 - Bell Labs - primeira rede óptica internacional, interligando EUA, Inglaterra e França - cabo óptico submarino TAT-8;
TELEBRASÍLIA - primeiro enlace de fibras ópticas monomodo do país com 25 km em Brasília;
- 1993 - AT&T – fibras ópticas monomodo com dispersão deslocada e não zero - NZD (Non Zero Dispersion);
- 1994 - EMBRATEL - instalado o primeiro cabo óptico submarino no país - América 1, interligando Fortaleza à Flórida (EUA);
IBM - sistema de transmissão com dois comprimentos de onda em uma única fibra óptica através da Multiplexação por Divisão do Comprimento de Onda WDM (Wavelength Division Multiplexing);
- 1996 - Vários fabricantes - equipamentos com mais de 16 comprimentos de onda em uma única fibra óptica através da Multiplexação Densa por Divisão do Comprimento de Onda (DWDM – Dense Wavelength Division Multiplexing);

- 1999 - Philip Russell desenvolveu a fibra de cristal fotônico com núcleo oco, a qual permite guiar luz pelo seu núcleo através da formação na casca de uma banda fotônica proibida;
- 2007 - Corning desenvolveu a fibra óptica “ClearCurve”, permitindo curvaturas da fibra óptica de até 5 mm de raio, a qual pode ser utilizada na rede interna da arquitetura de rede de transmissão óptica FTTx (Fiber To The “x”).

Fibras Ópticas: Princípio de Funcionamento

Duas abordagens teóricas possíveis:

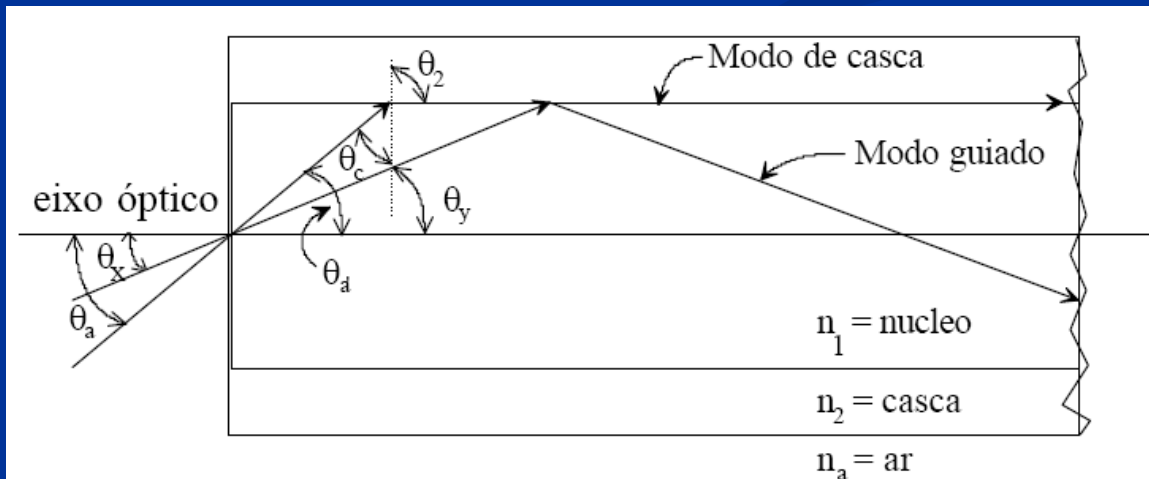
- 1 - óptica geométrica ou de raios
- 2 - óptica ondulatória (Teoria Eletromagnética)

1 - Óptica geométrica - Lei de Snell - reflexão total

Lei de Snell: $n_x \cdot \sin(\theta_x) = n_y \cdot \sin(\theta_y)$

onde n é índice de refração do meio:

$$n = \frac{\text{velocidade da luz no vácuo}}{\text{velocidade da luz no meio}}$$



Fibras Ópticas: Princípio de Funcionamento

$$n_a \cdot \sin(\theta_a) = n_1 \cdot \sin(\theta_a) = n_1 \cdot \cos(\theta_c) = n_1 \cdot \sqrt{1 - \sin^2(\theta_c)}$$

Para confinar a luz : $n_1 > n_2 > n_{ar}$

quando $\theta_2 = 90^\circ$

$$\sin(\theta_c) = \frac{n_2}{n_1}$$

assim:

$$n_a \cdot \sin(\theta_a) = n_1 \cdot \sqrt{1 - \sin^2(\theta_c)} = \sqrt{n_1^2 - n_1^2 \cdot \frac{n_2^2}{n_1^2}}$$

como $n_a = 1$:

$$\sin(\theta_a) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = NA$$

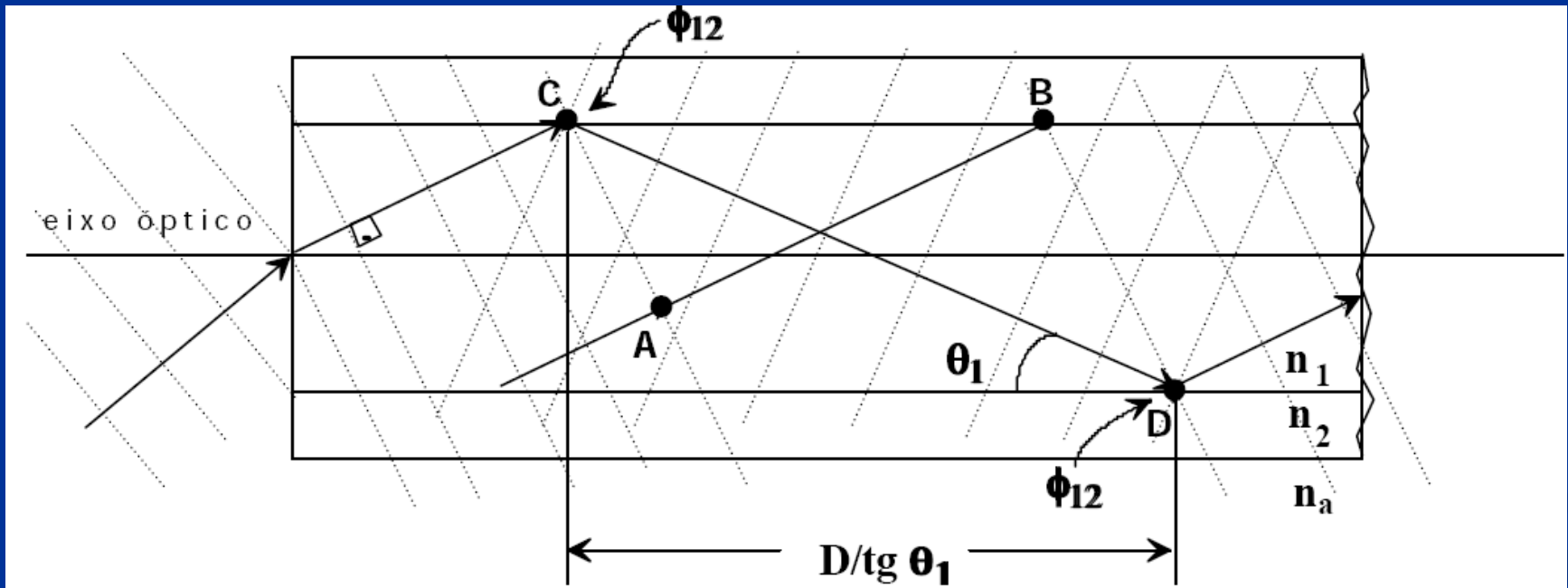
Abertura Numérica da Fibra Óptica

Ângulo de aceitação (crítico)

Modos de propagação

Condição de fase - (Impostas pela óptica ondulatória)

Equações de Maxwell - Lei ABCD



Modos de propagação

Vetor de onda: $\vec{K} = K_0 \cdot \vec{n}$

Número de onda no espaço livre: $K_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$

K: constante de fase no meio dado

ϕ : Atraso de fase

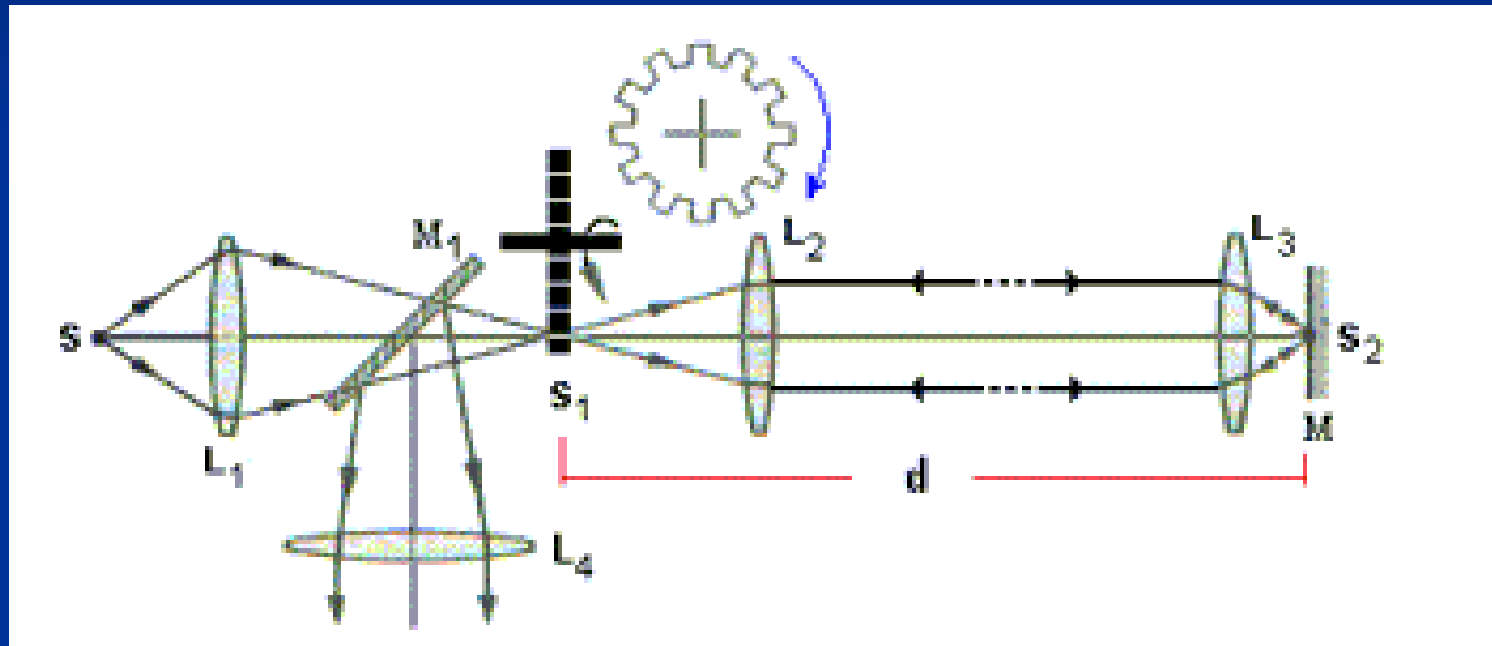
$$\phi_{AB} = K \cdot AB$$

$$\phi_{CD} = K \cdot CD$$

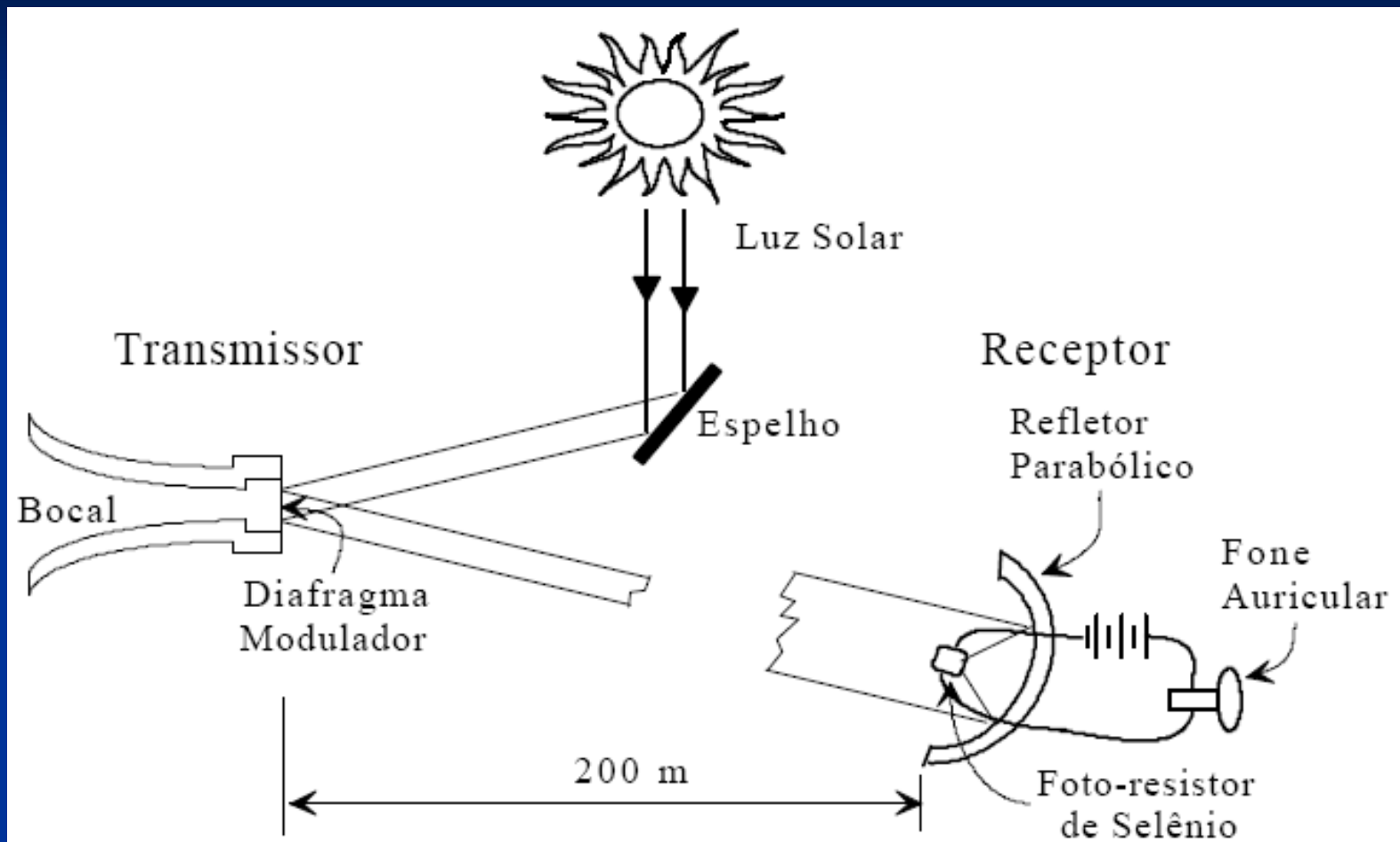
ϕ_{12} = constante, depende do coeficiente de reflexão Γ_{12}

- Para que haja fluxo de energia : $\phi_{AB} = \phi_{12} + \phi_{CD} + \phi_{12} + 2\pi N$
- Apenas um número finito de ângulos satisfarão a condição de fase para um dado diâmetro de núcleo, comprimento de onda da luz e relação entre índices de refração n_1 / n_2 .
- Estes ângulos definem os MODOS DE PROPAGAÇÃO.

Fizeau - Medição da Velocidade da Luz



Fotofone de Grahan Bell a luz solar



Onda Óptica Guiada: 1870 - John Tyndall

