

# Características das Fibras Ópticas

Aula 3

Prof.<sup>a</sup> Cindy Stella Fernandes

---

[cindy.fernandes@unifesspa.edu.br](mailto:cindy.fernandes@unifesspa.edu.br) – [cindy.fernandes@gmail.com](mailto:cindy.fernandes@gmail.com)

22/03/2022

# Agenda

---

- O guia de ondas óptico básico
- Abertura numérica da fibra óptica
- Modos de propagação nas fibras ópticas
- Fibra com perfil degrau e gradual
- Tipos de fibras ópticas
- Referências Bibliográficas

# O guia de ondas óptico básico

---

- A fibra óptica é um guia de onda dielétrico com estrutura cilíndrica e seção circular reta;
- Ao longo do comprimento da fibra, a estrutura e a distribuição, em geral, são uniformes;
- É composta de duas partes:
- **Núcleo:** Parte central da fibra por onde a luz é guiada.
- **Casca:** Parte externa da fibra que envolve o núcleo.

# Fibras Ópticas

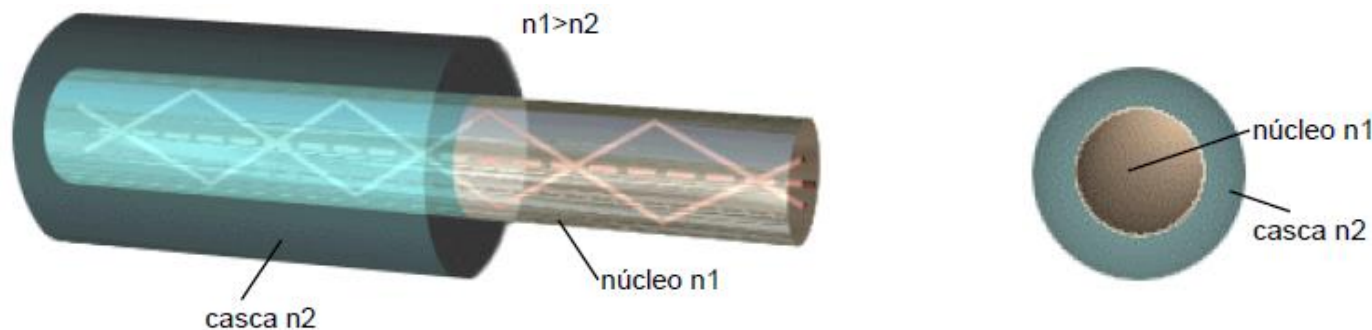
---

## 1. Caracterização

- A fibra óptica é um guia de onda dielétrico com estrutura cilíndrica e seção circular reta. Ao longo do comprimento da fibra a estrutura e a distribuição, em geral, são uniformes. É composta de duas partes:
- Núcleo : Parte central da fibra por onde a luz é guiada.
- Casca : Parte externa da fibra que envolve o núcleo, cujo índice de refração é menor que do núcleo para garantir que a luz se propague ao longo do núcleo pelo fenômeno da reflexão total ou interna.

# Fibras Ópticas

- Na seção transversal, o índice de refração é maior no núcleo,  $n_1$  (mais denso), que na casca  $n_2$  (menos denso);



- O princípio básico de funcionamento da fibra consiste em que haja uma reflexão total dos raios de luz na interface entre o núcleo e a casca. Isto é conseguido utilizando-se índices de refração diferentes para o núcleo e a casca.

# O guia de ondas óptico básico

---

- A variação de índice de refração na seção transversal da fibra é representada pelo perfil de índices de refração, e é obtido usando-se diferentes materiais dielétricos ou dopagens na sílica usada para a fabricação da fibra;

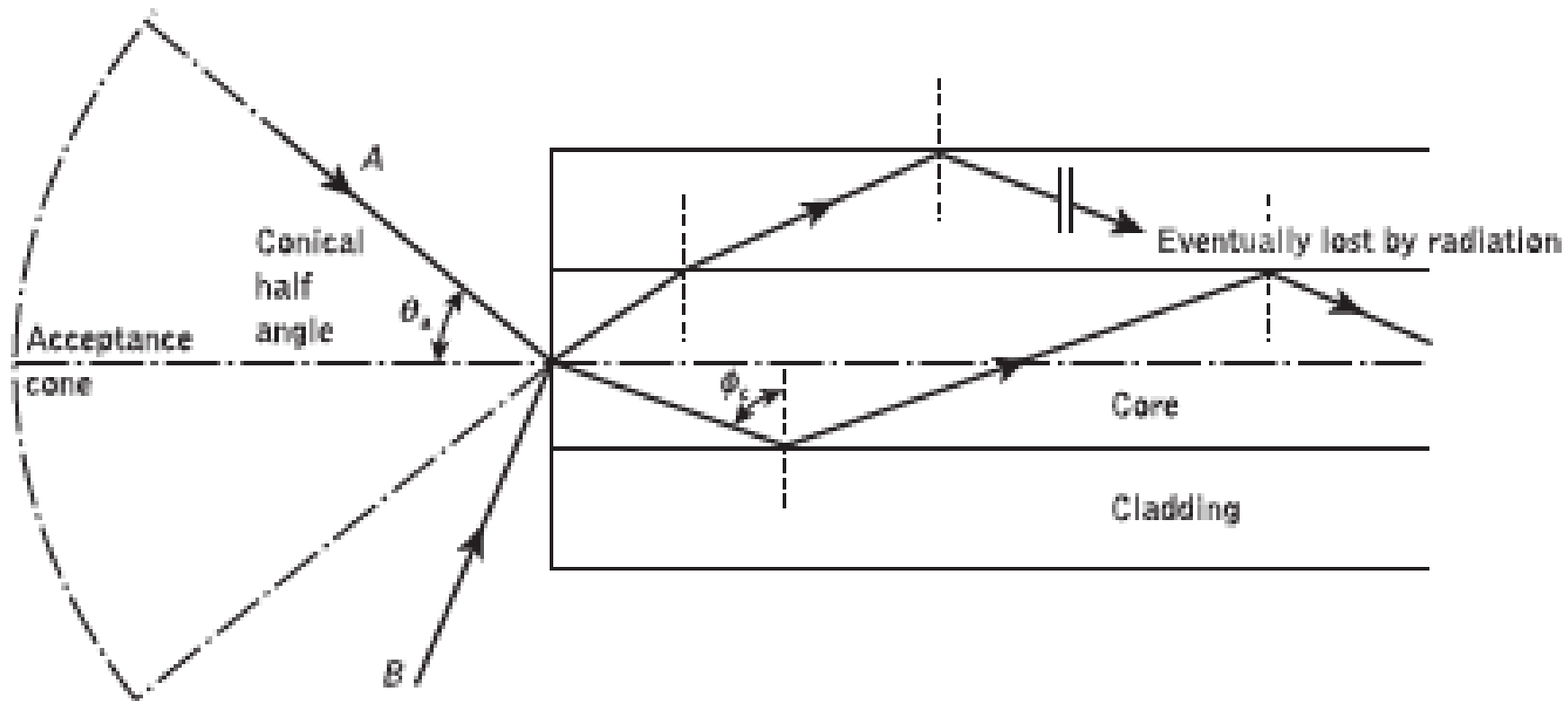
# Abertura numérica da fibra óptica

---

- Considerando que a propagação da luz na fibra óptica ocorre através da reflexão interna total na interface núcleo-casca, é útil ampliar a abordagem da óptica geométrica com referência aos raios de luz que entram na fibra;
- Uma vez que apenas os raios com ângulos maiores que  $\theta_c$  na interface núcleo-casca são transmitidos por reflexão interna total, fica claro que nem todos os raios que entram no núcleo da fibra continuarão a ser propagados no seu comprimento;

# Abertura numérica da fibra óptica

**Figura 2.** Ângulo de aceitação  $\theta_a$  quando uma luz é lançada dentro de uma fibra óptica.



Fonte: Optical Fiber Communications: Principles and Practice, 3ª edição



# Abertura numérica da fibra óptica

---

- Pôde ser observado na Figura 2 um raio A entrando no núcleo da fibra, com um ângulo  $\theta_a$  em relação ao eixo da fibra, sofrendo refração na interface ar-núcleo, antes que haja a transmissão para a interface núcleo-casca, no ângulo crítico;
- Consequentemente, qualquer raio que incide no núcleo da fibra com um ângulo maior que  $\theta_a$  será transmitido para a interface núcleo-casca, com um ângulo menor do que  $\theta_c$ , e não será totalmente refletido internamente;

# Abertura numérica da fibra óptica

---

- Assim, para que raios possam ser transmitidos por reflexão interna total no interior do núcleo da fibra, é necessário que incidam no núcleo da fibra dentro de um cone de aceitação, definido pelo meio ângulo cônico  $\theta_a$ ;
- Portanto,  $\theta_a$  é o ângulo máximo com relação ao eixo no qual a luz pode entrar na fibra para ser propagada, e é muitas vezes referido como ângulo de aceitação da fibra;

# Abertura numérica da fibra óptica

---

- O ângulo de aceitação para uma fibra óptica foi definido anteriormente;
- Entretanto, é possível obter uma relação entre o ângulo de aceitação e os índices de refração dos três meios envolvidos: núcleo, casca e ar;
- Isto conduz à definição de mais um termo geralmente usado, a abertura numérica da fibra óptica;

# Abertura numérica da fibra óptica

---

- A abertura numérica é o parâmetro que indica a capacidade de captar luz de uma determinada fibra óptica;
- Fisicamente, representa a capacidade de absorção de luz pela fibra, definindo o quanto de luz incidente sobre a extremidade da fibra é transmitida;

# Abertura numérica da fibra óptica

---

- Matematicamente, abertura numérica é o seno do ângulo máximo de aceitação da fibra óptica;

$$AN = n \cdot \sin\theta = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1)$$

- Como a abertura numérica é frequentemente usada considerando a fibra no ar, tem-se que  $n=1$ ;

# Abertura numérica da fibra óptica

---

- A abertura numérica também pode ser dada em termos da diferença relativa dos índices de refração entre o núcleo e a casca, definida por:

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2}$$

- Combinando as Eqs. (1) e (2), tem-se

$$\simeq \frac{n_1 - n_2}{n_1}, \text{ para } \Delta \ll 1 \quad (2)$$

$$NA = n_1 (2\Delta)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

# Abertura numérica da fibra óptica

---

## EXEMPLO 1:

Uma fibra óptica de sílica apresenta um índice de refração do núcleo igual a 1,50 e um índice de refração da casca igual a 1,47. Determine:

- a) O ângulo crítico na interface núcleo-casca;
- b) A abertura numérica para a fibra;
- c) O ângulo de aceitação na interface ar-fibra.

# Abertura numérica da fibra óptica

---

## EXEMPLO 2:

Uma típica diferença relativa dos índices de refração para uma fibra óptica projetada para transmissões a longa distância é de 1%. Estime a AN para uma fibra, quando o índice de refração do núcleo vale 1,46. Além disso, calcule o ângulo crítico na interface núcleo-casca dentro da fibra.



# Modos de propagação nas fibras ópticas

---

- A fibra óptica pode se estudada como um guia de ondas para frequências ópticas;
- Desta maneira, dado um comprimento de onda  $\lambda_0 = \frac{c}{f}$ , uma fibra óptica de índices de refração  $n_1$  e  $n_2$  pode ser dimensionada para transmitir vários modos de propagação ou apenas o modo fundamental;

# Modos de propagação nas fibras ópticas

---

- Portanto, seu comportamento é semelhante ao dos guias de onda condutores, que trabalham com frequências de microondas;
- Entretanto, a fibra óptica possui uma diferença básica;
- Enquanto o guia de onda é construído com material condutor, a fibra é feita com material isolante;

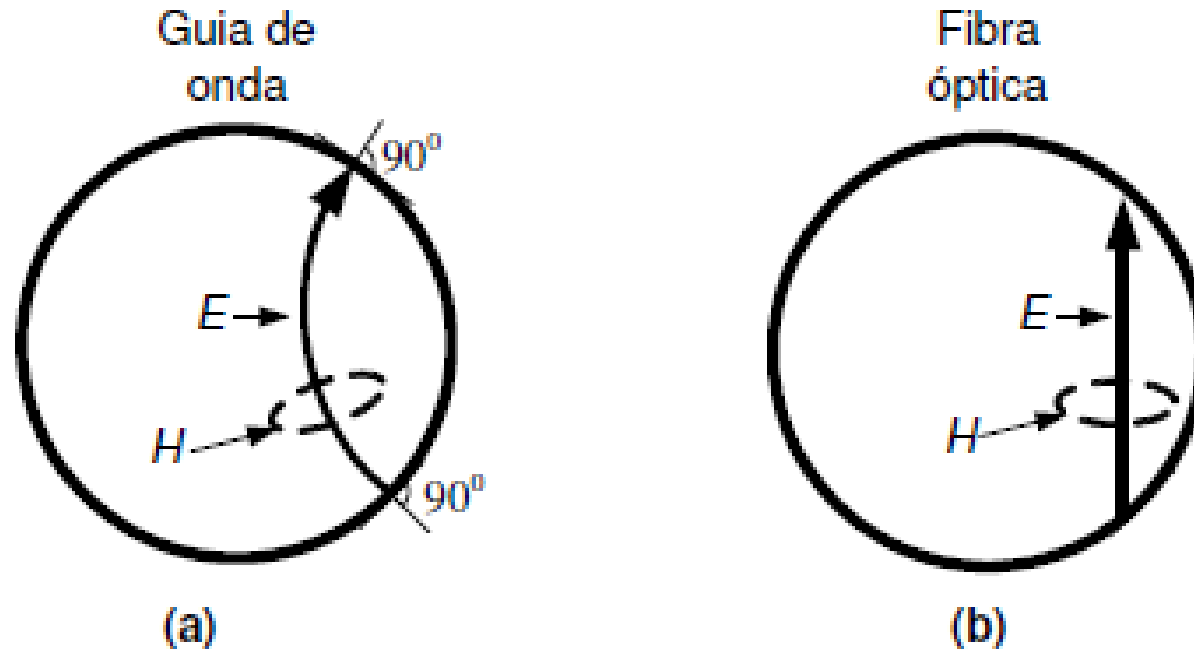
# Modos de propagação nas fibras ópticas

---

- Um condutor ideal não permite que haja linhas de campo elétrico tangenciando a sua superfície;
- Portanto, toda linha de campo elétrico ao sair ou chegar em um condutor, o faz com um ângulo de 90 graus em relação à superfície desse condutor;
- Isso influi, também, na geometria dos campos magnéticos, pois o plano de toda linha magnética é normal às linhas de campo elétrico, como mostra a Figura 3a;

# Modos de propagação nas fibras ópticas

**Figura 3.** Distribuição das linhas de campo elétrico em (a) guias de onda e (b) fibra óptica



Fonte: Apostila Comunicação Óptica

# Modos de propagação nas fibras ópticas

---

- Já na fibra óptica, aquela restrição relacionada com o campo elétrico não existe, pois o material com que é feita a casca é isolante;
- Isto faz com que na fibra óptica, além dos modos  $TE_{mn}$  e  $TM_{mn}$ , se tenha mais dois tipos de modo de propagação, que não existem nos guias de onda de material condutor;

# Modos de propagação nas fibras ópticas

---

- São os modos híbridos  $HE_{mn}$  e  $EH_{mn}$ ;
- Ambos possuem uma mistura dos modos TE e dos modos TM, embora um deles seja sempre minoritário;
- Quando, no plano transversal, predominam as linhas de campo elétrico, tem-se os modos  $HE_{mn}$ ;

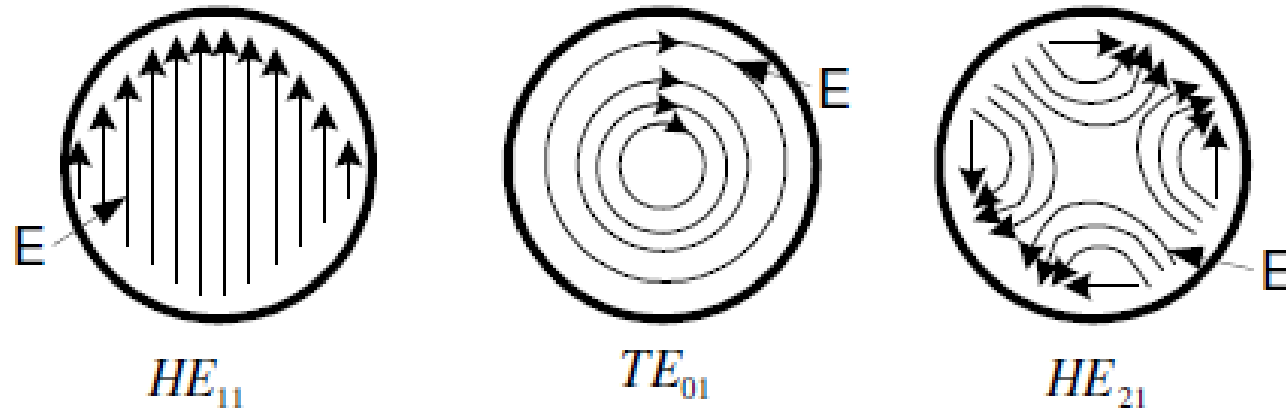
# Modos de propagação nas fibras ópticas

---

- Quando, no plano transversal, predominam as linhas de campo magnético, tem-se os modos  $EH_{mn}$ ;
- A Figura 4 mostra algumas configurações de campo elétrico no plano transversal da fibra óptica;
- No caso das fibras ópticas, o modo fundamental é o  $HE_{11}$ ;

# Modos de propagação nas fibras ópticas

**Figura 4.** Exemplos de modos de propagação existentes nas fibras ópticas.



Fonte: Apostila Comunicação Óptica



# Modos de propagação nas fibras ópticas

---

- No estudo das características dos modos de propagação em fibra óptica, é utilizado um parâmetro  $V$  que representa a frequência de operação normalizada;

$$V = \frac{\pi d}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (5)$$

- O parâmetro  $V$  determina o número de modos que uma fibra pode suportar;

# Modos de propagação nas fibras ópticas

---

- O número de modos que podem existir em um guia de onda, como função de  $V$ , pode ser convenientemente representado em termos da constante de propagação normalizada, definida por

$$b = \frac{(\beta/k)^2 - n_2^2}{n_1^2 - n_2^2} \quad (4)$$

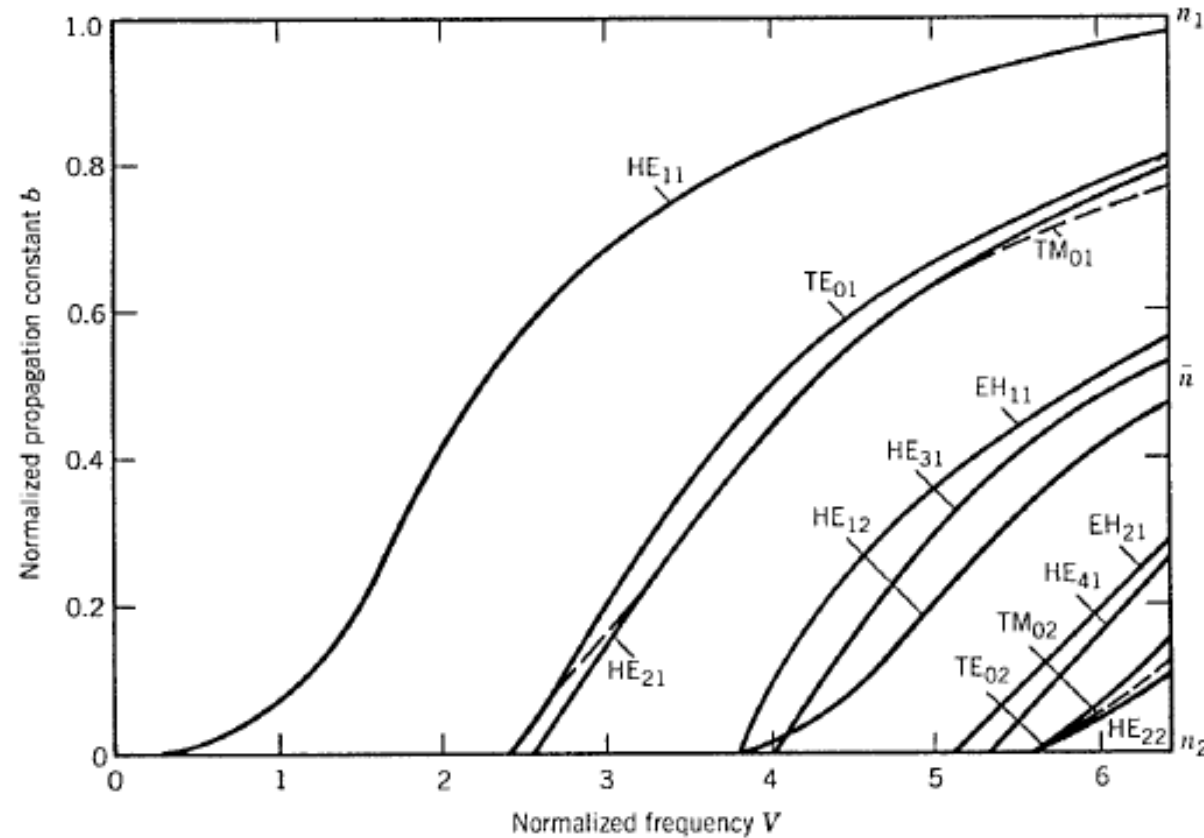
# Modos de propagação nas fibras ópticas

---

- O gráfico de  $b$  em função de  $V$  é mostrado na Figura 5, para alguns modos de baixa-ordem;
- Uma fibra com um alto valor de  $V$  suporta muitos modos de propagação;
- Uma estimativa aproximada do número de modos para uma fibra multimodo índice degrau é dada por  $V^2/2$ ;

# Modos de propagação nas fibras ópticas

**Figura 5.** Constante de propagação normalizada  $b$  em função da frequência normalizada  $V$  para alguns modos de baixa-ordem.



Fonte: Optical Fiber Communications: Principles and Practice, 3ª edição.

# Modos de propagação nas fibras ópticas

---

## Exemplo 3:

- Uma fibra óptica possui o raio do núcleo  $a = 10 \mu m$ ,  $n_1 = 1,46$  e  $n_2 = 1,44$ . Para um comprimento de onda  $\lambda_0 = 0,85 \mu m$ , estimar em quantos modos a onda de luz se distribui em sua propagação pela fibra.

# Modos de propagação nas fibras ópticas

---

## Exemplo 4:

- Uma fibra óptica possui  $n_1 = 1,46$  e  $n_2 = 1,44$ . Ela deve transmitir um sinal em um comprimento de onda  $\lambda_0 = 0,85 \mu m$ . Deseja-se trabalhar com  $V = 2$ , para assegurar que a propagação seja monomodo. Determine o raio  $a$  do núcleo.

# Modos de propagação nas fibras ópticas

---

## Exemplo 5:

- Uma fibra óptica possui  $n_1 = 1,46$  e  $n_2 = 1,44$ . O raio do núcleo é  $1,97 \mu\text{m}$ . Determinar os modos que se propagam quando se trabalha com um sinal luminoso de comprimento de onda  $\lambda_0 = 0,85 \mu\text{m}$ .

# Fibra com perfil degrau e gradual

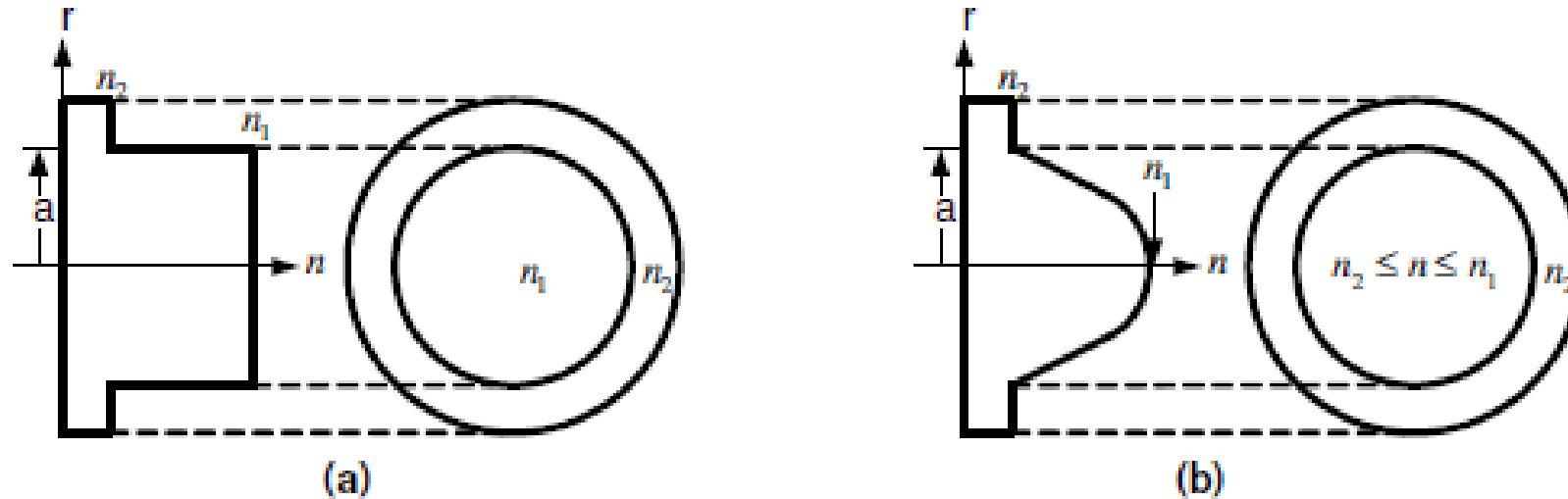
---

- O comportamento da propagação da luz na fibra está relacionado com a variação do índice de refração ao longo do raio da fibra;
- Existem dois tipos de perfis de índices de refração para fibras:
- **Perfil Degrau:** o núcleo possui índice de refração constante maior que o da casca. Isto cria uma variação abrupta entre o núcleo e a casca;
- **Perfil Gradual:** a variação do índice de refração do centro da fibra em direção à casca diminui gradativamente.
- A Figura 6 ilustra os dois tipos de perfis de índice de refração para as fibras;



# Fibra com perfil degrau e gradual

**Figura 6.** Tipos de perfis de índice de refração para fibras ópticas: (a) degrau e (b) gradual.



Fonte: Apostila Comunicação Óptica

# Fibra com perfil degrau e gradual

---

- Conforme mencionado, a fibra IG possui um núcleo onde o índice de refração é máximo no centro da fibra e decai até atingir o valor de  $n_2$  na sua junção com a casca;
- A variação do índice mais utilizada é a parabólica;
- Sendo  $a$  o raio do núcleo e  $r$  qualquer distância radial até o centro do núcleo, tem-se para o índice de refração:

# Fibra com perfil degrau e gradual

---

$$n(r) = n_1 \left[ 1 - \Delta \times \left( \frac{r}{a} \right)^2 \right] \quad \text{para } r < a$$

$$n(r) = n_1 [1 - \Delta] = n_2 \quad \text{para } r \geq a$$

$$\text{onde } \Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

# Fibra com perfil degrau e gradual

---

## Exemplo 6:

Dados os índices de  $n_1 = 1,46$  e  $n_2 = 1,44$ , determinar o valor de  $n$  para  $r = 0,7a$ .

# Tipos de fibras ópticas

---

- As fibras ópticas costumam ser classificadas a partir de suas características básicas de transmissão, ditadas essencialmente pelo perfil de índices de refração da fibra e pela sua habilidade em propagar um ou vários modos;
- Com implicações principalmente na capacidade de transmissão e nas facilidades operacionais, resultam dessa classificação os principais tipos de fibra óptica:
- **Fibra multimodo**
- **Fibra monomodo**

# Tipos de fibras ópticas – Fibra Multimodo

---

- Refere-se à possibilidade de que vários feixes, em diferentes incidências, propaguem através de diferentes caminhos pela fibra;
- A fibra multimodo pode ainda ser classificada de acordo com o perfil de índice de refração, que pode ser:
- **Fibra multimodo de índice degrau**
- **Fibra multimodo de índice gradual**

# Tipos de fibras ópticas – Fibra Multimodo ID

- As fibras ópticas do tipo multimodo índice degrau, conceitualmente as mais simples, foram as pioneiras em termos de aplicações práticas;
- Considerando-se as dimensões típicas e o material usual de fabricação, as fibras multimodo ID caracterizam-se pela existência de milhares de modos;

# Tipos de fibras ópticas – Fibra Multimodo ID

---

- O grande número de modos existentes numa fibra multimodo ID tem importantes implicações quanto a sua capacidade de transmissão;
- De fato, a variedade de modos existentes resulta num aumento da dispersão do sinal transmitido;



# Tipos de fibras ópticas – Fibra Multimodo ID

---

- Uma das principais propriedades das fibras multimodo ID é a sua grande capacidade de captar energia luminosa;
- Em aplicações diferentes dos sistemas de telecomunicações, onde o mais importante é a capacidade de captação de luz, existem fibras multimodo ID compostas totalmente por plástico;

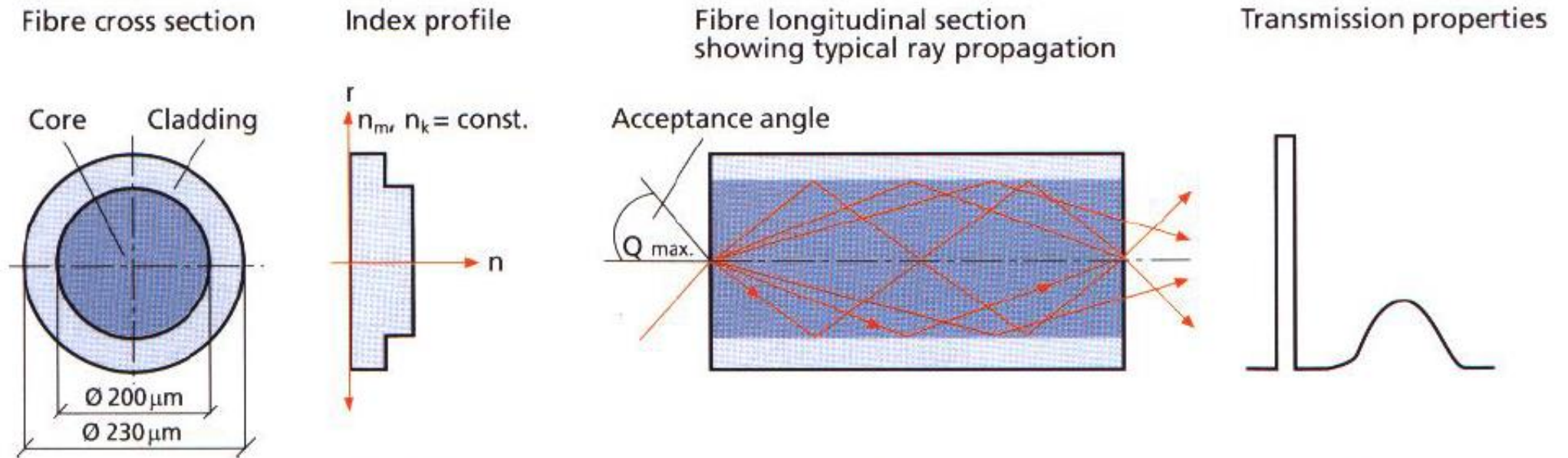
# Tipos de fibras ópticas – Fibra Multimodo ID

---

- O diâmetro do núcleo de uma fibra multimodo ID é tipicamente igual ou superior 100  $\mu\text{m}$ ;
- Essa característica física permite o uso de conectores de menor precisão e fontes luminosas menos diretivas;
- Geralmente operam na janela de transmissão  $\lambda_0 = 850 \text{ nm}$ ;
- A Figura 7 ilustra algumas características da fibra multimodo ID;

# Tipos de fibras ópticas – Fibra Multimodo ID

**Figura 7.** Fibra multimodo índice degrau (ID).



Fonte: Apostila Sistemas de Comunicação Óptica

# Tipos de fibras ópticas – Fibra Multimodo ID

---

- As fibras multimodo índice gradual (IG), de conceituação e fabricação um pouco mais complexa, caracterizam-se pela sua maior capacidade de transmissão em relação às fibras multimodo ID;
- Desenvolvidas especialmente para as aplicações em sistemas de telecomunicações, as fibras multimodo IG apresentam dimensões menores que as de índice degrau e aberturas numéricas não muito grandes, a fim de garantir uma banda passante adequada às aplicações;

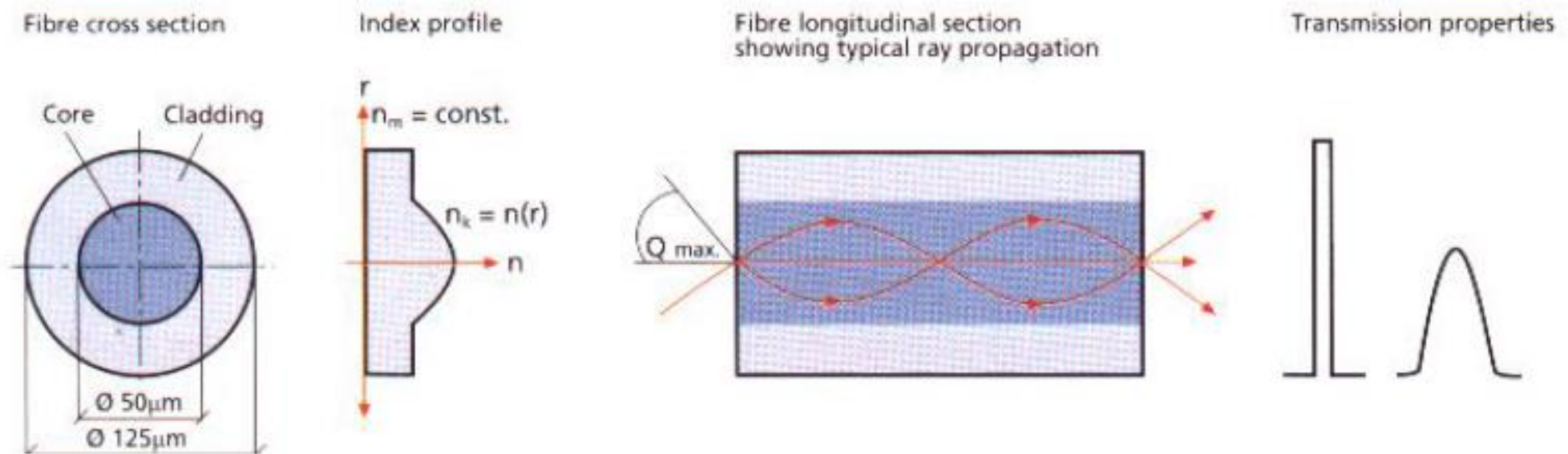
# Tipos de fibras ópticas – Fibra Multimodo IG

---

- As dimensões típicas de uma fibra multimodo IG incluem diâmetros do núcleo variando entre 50-62,5  $\mu\text{m}$  (para um diâmetro de casca igual a 125  $\mu\text{m}$ ;
- Geralmente operam nas janelas de transmissão  $\lambda_0 = 850 \text{ nm}$  e  $\lambda_0 = 1310 \text{ nm}$ ;
- A Figura 8 ilustra algumas características da fibra multimodo IG;

# Tipos de fibras ópticas – Fibra Multimodo IG

**Figura 8.** Fibra multimodo índice gradual (IG).



Fonte: Apostila Sistemas de Comunicação Óptica

# Tipos de fibras ópticas – Fibra monomodo

- As fibras ópticas do tipo monomodo distinguem-se das fibras multimodo, basicamente, pela capacidade de transmissão superior e pelas dimensões menores;
- As dimensões muito reduzidas das fibras monomodo exigem o uso de dispositivos e técnicas de alta precisão para a realização de conexões entre segmentos de fibras e do acoplamento da fibra com as fontes e detectores luminosos;

# Tipos de fibras ópticas – Fibra monomodo

---

- Embora as fibras monomodo caracterizem-se por diâmetros do núcleo tipicamente inferiores a  $10\text{ }\mu\text{m}$ , as dimensões da casca permanecem na mesma ordem de grandeza das fibras multimodo ( $125\text{ }\mu\text{m}$ );
- Isso resulta do fato da casca ter de ser suficientemente espessa para acomodar completamente o campo evanescente do modo propagado, tornando-o desprezível na interface externa da casca;



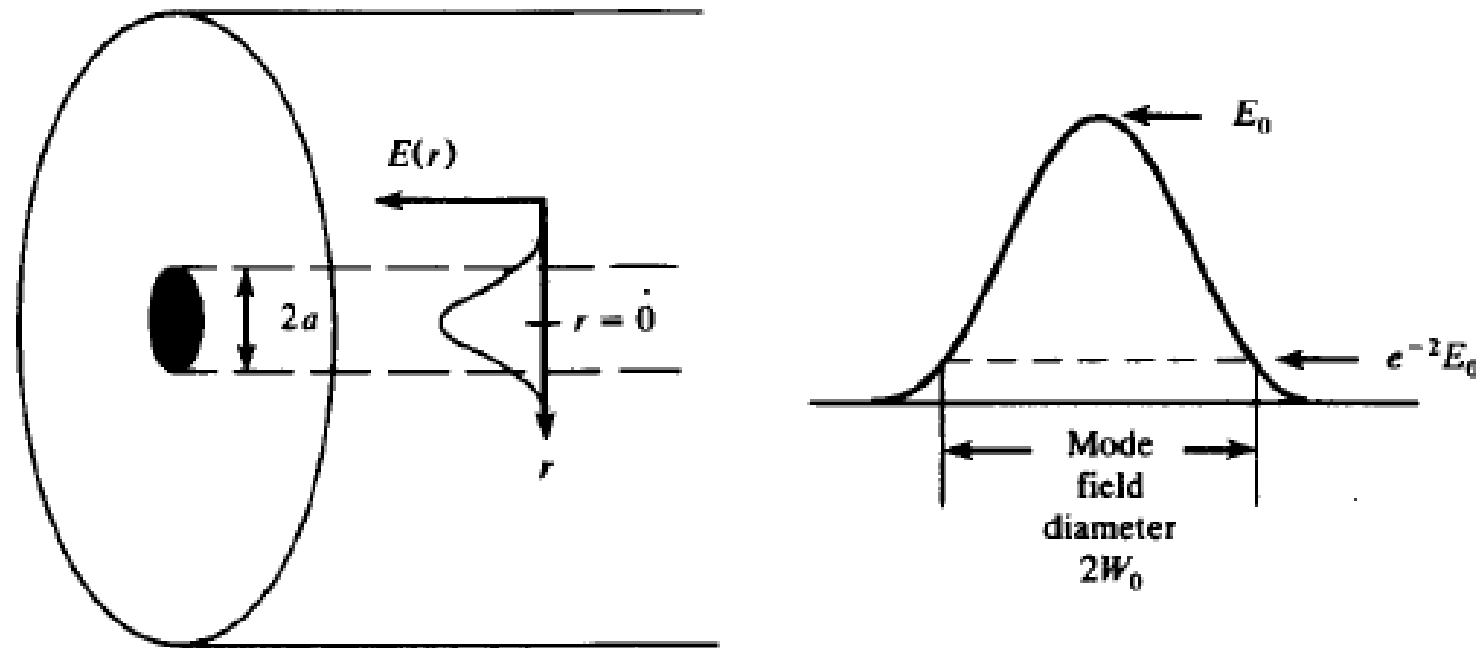
# Tipos de fibras ópticas – Fibra monomodo

---

- Um parâmetro importante que define a eficiência no acoplamento da potência do modo fundamental no núcleo da fibra monomodo é o chamado raio modal, o qual é ilustrado na Figura 9;
- Enquanto nas fibras multimodo a potência luminosa se propaga quase que inteiramente no núcleo da fibra, no caso das fibras monomodo uma quantidade considerável do sinal se propaga na casca da fibra;
- Para um acoplamento ótimo, o raio modal deve ser próximo do raio do núcleo da fibra;

# Tipos de fibras ópticas – Fibra monomodo

**Figura 9.** Distribuição da luz em uma fibra monomodo.



Fonte: Optical Fiber Communication, 3ª edição.

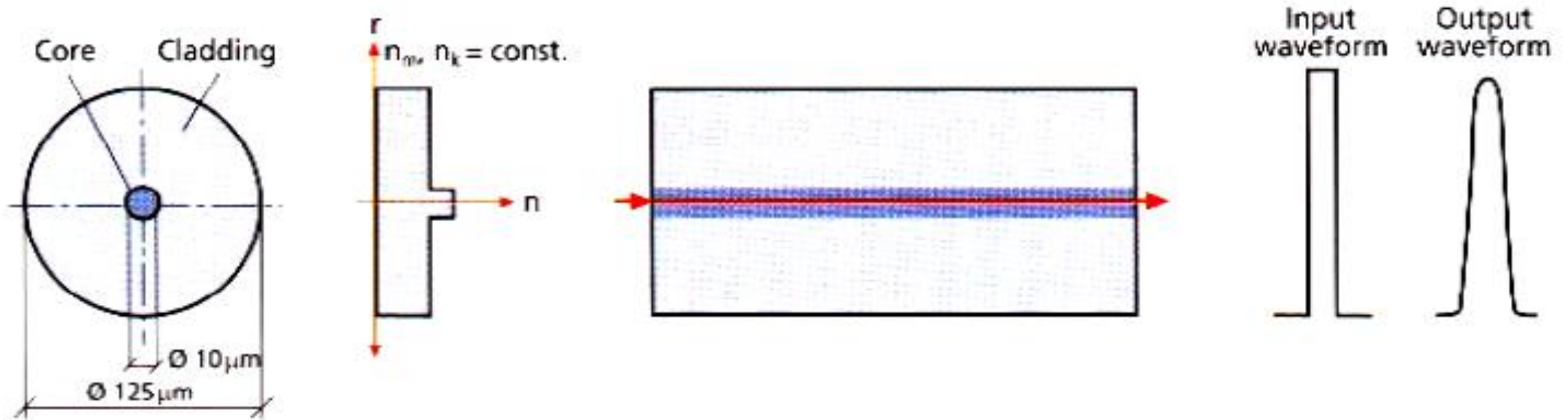
# Tipos de fibras ópticas – Fibra monomodo

---

- Geralmente operam nas janelas de transmissão  $\lambda_0 = 1310 \text{ nm}$  e  $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$ ;
- A Figura 10 ilustra algumas características da fibra monomodo;

# Tipos de fibras ópticas – Fibra monomodo

Figura 10. Fibra monomodo.



Fonte: Apostila Sistemas de Comunicação Óptica

# Bibliografia

---

## Bibliografia Básica

- KEISER, G.: **Optical Fiber Communications**. Mac-Graw Hill, 2000.
- RIBEIRO, J. A. J.: **Comunicações Ópticas**. 4ª edição. São Paulo. Editora Érica, 2003.
- AGRAWAL, G. P.: **Fiber-Optic Communication Systems**. John Wiley & Sons, 2002.
- PINHEIRO, J. M. dos S.: **Cabeamento Óptico**. São Paulo. Editora Campus, 2004.
- SENIOR, J. M.: **Optical Fiber Communications: Principles and Practice**. Prentice-Hall, 2009.

# Contato

---

## Contato Aluno/professor

- **SIGAA (Oficial)**
- Dias de aulas
- E-mails para contato: cindy.fernandes@unifesspa.edu.br (Oficial Unifesspa)  
cindy.fernandes@gmail.com (Não Oficial - pessoal)
- WhatsApp: (91) 98256 – 9649 (Não Oficial)