



UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA

CAMPUS I

CENTRO CIÊNCIAS E TECNOLOGIA – CCT

CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA

LUCAS ALLYSON HERMINIO SOUSA

FIBRAS ÓPTICAS NAS REDES DE COMUNICAÇÃO: UMA REVISÃO DA LITERATURA

**CAMPINA GRANDE
2017**

LUCAS ALLYSON HERMINIO SOUSA

FIBRAS ÓPTICAS NAS REDES DE COMUNICAÇÃO: UMA REVISÃO DA LITERATURA

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado ao curso de Licenciatura em Física, do Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual da Paraíba, como exigência para obtenção de título de Licenciado em Física.

Orientadora: Profa. Dra. Tâmara Pereira Ribeiro de Oliveira Lima e Silva.

CAMPINA GRANDE
2017

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do Trabalho de Conclusão de Curso.

S725f Sousa, Lucas Allyson Herminio.
Fibras ópticas nas redes de comunicação [manuscrito] :
uma revisão da literatura / Lucas Allyson Herminio Sousa. -
2017
40 p. : il. colorido.

Digitado.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Física) -
Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e
Tecnologia, 2017.
"Orientação : Profa. Dra. Tâmara Pereira Ribeiro de
Oliveira Lima e Silva, Coordenação do Curso de Física - CCT."

1. Fibra óptica. 2. Redes de comunicação. 3. Cabos
ópticos submarinos. 4. Lasers.

21. ed. CDD 537

LUCAS ALLYSON HERMINIO SOUSA

FIBRAS ÓPTICAS NAS REDES DE COMUNICAÇÃO: UMA REVISÃO DA LITERATURA

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado ao curso de Licenciatura em Física, do Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual da Paraíba, com exigência para obtenção de título de Licenciado em Física.

Aprovada em: 01/11/2017.

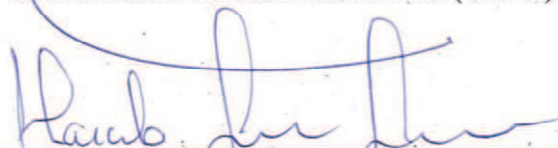
BANCA EXAMINADORA



Profª. Dra. Tâmara Pereira Ribeiro de Oliveira Lima e Silva (Orientadora)
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Dr. Edvaldo de Oliveira Alves
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Dr. Marcelo Gomes Germano
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

A toda minha família, pela dedicação e companheirismo às noites mal dormidas...

DEDICO!

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades, permitindo que tudo isso acontecesse, não somente nestes anos como universitário, mas em todos os momentos de minha vida.

À professora Dr^a. Tâmara Pereira Ribeiro de Lima e Silva pelas leituras sugeridas ao longo dessa orientação e pela dedicação, como também pela paciência e confiança em minha pessoa. Obrigado por acreditar e não desistir de mim!

Agradeço aos professores participantes da banca examinadora que dividiram comigo este momento tão importante e esperado: prof. Dr. Edvaldo de Oliveira Alves (Mará) e prof. Dr. Marcelo Gomes Germano.

Aos meus pais, pelo amor, ajudas incontáveis e incentivos a nunca desistir dos meus sonhos. Meu pai Francisco de Assis (*in memoriam*), que sempre me ajudou nos experimentos de física, a minha mãe Maria de Lourdes, que nunca mediu esforços para me ajudar e me dar aquilo que necessitava mesmo sem condições, sempre me dando força. Aos meus irmãos Marcos, Lays e Tony, e a minha namorada Laura Soares, que sempre estiveram ao meu lado quando precisei.

Aos colegas de classe que ganhei durante o curso pelos momentos de amizade e apoio, Anderson Tiago, Cinthya Silva, Melyna Simões, Andre Souza, Mauro Vinicius, Elane Vieira, Gustavo Santos, Maria Paula, Mayra Lindsley, Flavio Ygor, Eduardo Lourenço, Ronaldo Andrade, Ângelo Fernandes, Romário, Marciana Cavalcante, Emmanuely França e Alcineide Moura, muito obrigado pela amizade de vocês e pelas horas de estudo e diversão juntos.

Aos professores do Departamento de Física da UEPB, por me proporcionarem o conhecimento tanto de conteúdos do curso, como a manifestação do caráter e afetividade da educação no processo de formação profissional.

Enfim a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, me ajudando a trilhar essa caminhada, o meu muito obrigado agradeço.

RESUMO

Desde a invenção da fibra óptica, suas aplicações em sistemas de transmissão de dados foram se tornando cada vez mais importantes. Atualmente a comunicação por fibra óptica, cujo princípio de funcionamento leva em conta conceitos de reflexão interna total, janelas ou bandas de transmissão ópticas e dispositivos associados à propagação de dados, vem sendo utilizada em diversas áreas. Neste trabalho de conclusão de curso, uma breve revisão da literatura sobre o tema, será visto como surgiu a fibra, onde será explorada um pouco da história da evolução das comunicações ópticas. Será analisado as propriedades das fibras e suas vantagens e qual delas é recomendado para cada tipo de rede. Também será discutido sobre alguns dos componentes dos sistemas de comunicação óptica e tecnologias relacionadas, analisando seu funcionamento e onde são usados (podem ser utilizados LEDs ou lasers para a transmissão das informações; assim o comprimento de onda emitido pela fonte luminosa influencia na transmissão dos dados). Por fim será abordado o uso da fibra em redes de comunicações intercontinentais, onde será discutido sobre os cabos ópticos submarinos e algumas características de suas aplicações.

Palavras-chaves: Fibra óptica. Comunicação. Lasers. Cabos ópticos submarinos.

ABSTRACT

Since the invention of the optical fiber, its applications in data transmission systems have become of great importance. Nowadays network communication via optical fiber, which takes into account concepts about total internal reflection, transmitting windows (or optical bands) and apparatus associated with data transmission, has been used in several areas of science and technology. In this work, a brief review about the theme, we will see a little about the history and the evolution of optical fiber communication, then we will discuss light behavior during transmission of data in a network communication system. We also analyze the types and characteristics of the fibers, as well as their advantages depending on the type of network and related technology (LEDs or lasers can be used as light source for transmitting, and their wavelength influences on it). In the end we approach the use of optical fibers in intercontinental communication via submarine cables and some properties of their applications.

Keywords: Optical fiber. Communication. Lasers. Submarine optical cables.

Sumário

INTRODUÇÃO	8
1. BREVE HISTÓRICO	9
2. A NATUREZA DA LUZ	12
2.1 REFLEXÃO E REFRAÇÃO	12
2.2 REFLEXÃO INTERNA TOTAL.....	15
3. ESTRUTURA BÁSICA DAS FIBRAS ÓPTICAS	19
3.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DA FIBRA ÓPTICA E ABERTURA NUMÉRICA .	19
3.2 TIPOS DE FIBRA	20
3.3 VANTAGENS DAS FIBRAS ÓPTICAS	23
4. REDES DE COMUNICAÇÃO	26
4.1 JANELAS DE TRANSMISSÃO E TIPOS DE REDE.....	26
4.2 REDES TELEFÔNICAS E CABOS SUBMARINOS.....	31
CONSIDERAÇÕES FINAIS	34
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	35

INTRODUÇÃO

Para falar das aplicações e da tecnologia usada nas fibras ópticas, é preciso conhecer os elementos básicos usados nos sistemas de transmissão e saber quais os tipos de aplicações que existem.

Para acontecer a transmissão por meio da fibra óptica, são necessários alguns aparatos como o transmissor óptico, o receptor óptico e a própria fibra óptica [MARCUSE, 1972]. A informação é enviada pela modulação da fonte de luz, que pode ser analógica ou digital.

Existem vários tipos de sistema de transmissão, e o que os diferenciam são suas características, do ponto de vista de aplicação (ponto a ponto ou multi-ponto), o porte e sua transmissão (longas distâncias ou locais), a detecção usada (direta ou coerente), a multiplexação entre outros [SENIOR, 1985].

Neste Trabalho de Conclusão de Curso serão discutidas as propriedades das fibras ópticas, seu funcionamento e como estão associados às redes de comunicação atuais.

No capítulo 1 será feito um breve histórico sobre a origem das fibras ópticas e como se deu início à aplicação de sua tecnologia para se transmitir informação. No capítulo 2, será discutido a natureza da luz e a reflexão interna total, que se relaciona à propagação do feixe luminoso no interior da fibra.

No capítulo 3, será abordado a estrutura básica de uma fibra óptica de modo qualitativo. No capítulo 4, fechando esta revisão bibliográfica qualitativa, comentaremos sobre janelas de transmissão (conceito associado às bandas de comunicação) e sobre redes telefônicas e cabos submarinos, isto é, discutiremos algumas aplicações do que chamamos “network communications” presentes no nosso cotidiano, através da internet e tecnologias auxiliares como redes de TV a cabo, wi-fi e até no mouse óptico.

1. BREVE HISTÓRICO

Desde séculos passados, a luz é usada como meio de comunicação. O Sol foi o primeiro tipo de fonte luminosa, onde, com a ajuda de espelhos, conseguia enviar mensagens de um ponto a outro. À noite eram usadas tochas de fogo. Dizem que, no século VI a.C., os gregos usaram sinais de fogo para avisar sobre a queda de Tróia [LACY, 1982].

Em 1791 o francês Claude Chappe construiu o Semaphore, considerado o primeiro sistema de comunicação digital da história [LACY,1982]. Ele era um dispositivo colocado em torres no alto de colinas e que permitia a transmissão de informações a certas distâncias (essas distâncias permitiam que uma torre visualizasse a próxima e a anterior). Depois do Semaphore, outra invenção importante foi o Photophone, criada por Alexander Graham Bell em 1880 [CHERIN, 1983]. O Photophone só funcionava com a luz solar.

Os sistemas vistos até agora eram todos transmitidos por meio da atmosfera. Mas em 1870 John Tyndall demonstrou a primeira transmissão de um feixe de luz por um meio diferente do ar. Ele usou um jato de água fino e curvo [SUEMATSU, 1982].

Em 1910, os alemães Hondros e Debye analisaram a propagação eletromagnética em cilindros dielétricos, estrutura fundamental da fibra óptica [HONDROS, 1910]. Em 1930 outro alemão, Lamb, desenvolveu as primeiras experiências de transmissão de luz em fibras de vidro [SUEMATSU, 1982]. Mas somente em 1951 fizeram uso prático de fibras ópticas, quando o holandês Heel e os ingleses Hopkins e Kapany inventaram o fiberscope, sendo utilizado principalmente para uso médico [SUEMATSU, 1982]. Em 1958, com a invenção do laser (light amplification by stimulated emission of radiation ou amplificação da luz por emissão estimulada de radiação) [SHAWLOW, 1958], o desenvolvimento em comunicações ópticas teve um novo estímulo. Com suas características, ele permitia criar sistemas de comunicações ópticas de longo alcance com grande banda passante.

Enquanto as fontes e os receptores luminosos vinham sempre sofrendo grandes avanços tecnológicos, o sistema de transmissão óptica estagnava na falta de disponibilidade de um meio apropriado para o tráfego da luz à distância. A atmosfera era bastante limitada. Nesse período, foram estudados tipos de matérias que pudessem ser usado para o transporte da luz [OKOSHI, 1982]. Esses estudos serviram para, mais tarde, ajudar no avanço das fibras ópticas. Por exemplo, o guia de onda óptico de gás com variação gradual no índice de refração [NISHIZAWA, 1964]. Em 1966, houve o anúncio de um receptor óptico, o fotodiodo de avalanche (APD) de germânio [MELCHIOR, 1966].

Em 1966, Kao e Hockman exibiram um trabalho que sugeria a chance de usar fibras de vidro em sistemas à longa distância [KAO, 1966]. As fibras avaliadas tinham uma estrutura de núcleo e casca conforme Kapany e outros haviam sugerido em 1958 [SUEMATSU, 1982].

O trabalho mostrava que a atenuação das fibras era por causa de impurezas e não por conta do material do vidro. Com isso, alguns países começaram a procurar meios para purificar o vidro utilizado.

Logo no começo, para transmissões de grande alcance as fibras utilizadas eram do tipo monomodo (veremos mais aprofundado no capítulo 3). Depois, devido a algumas dificuldades dessas fibras, começaram a usar as fibras multimodo. Que por sua vez, também tinha algumas limitações, que foram minimizadas com o uso de fibras multimodo com índice gradual. Esse tipo de fibra foi estudado por Kawakami e Nishizawa em 1968 [KAWAKAMI, 1968], e seu material básico era o vidro composto.

Com os estudos cada vez mais avançados, sempre havia algum resultado que melhorava as transmissões via fibra óptica. Em 1970 criaram os diodos a laser, que operava continuamente em temperatura ambiente [HAYASHY, 1970]. E em 1971, Burrus e Miller apresentaram os primeiros diodos emissores de luz (LED) apropriados à transmissão por fibra óptica [BURRUS, 1971].

As empresas se empenhavam cada vez mais para diminuir a atenuação das fibras. Por exemplo, a Bell Laboratories, em 1973, apresentou um trabalho muito importante, analisando o desempenho dos receptores ópticos em sistemas digitais [PERSONICK, 1973]. Ainda no mesmo ano, nos EUA, é relatada a fabricação do diodo laser de estrutura DHS [HARTMAN, 1973], sendo assim, um grande avanço nas fontes luminosas para sistemas de telecomunicações. Já em 1975, os ingleses Payne e Gambling identificaram, na região espectral, uma janela de dispersão mínima para as fibras de sílica [PAYNE, 1975], com base nisso, os estudos se voltaram para essa região, pois ela tinha possibilidade de realizar sistemas com grande capacidade de transmissão. Cada avanço que era dado era minimizado as perdas nas transmissões, sendo a única causa, as propriedades intrínsecas do material.

Deram início, em 1976, os primeiros sistemas de transmissão com fibras ópticas. Ele distribuía sinal de televisão por cabo a 34.000 assinantes. Já em 1977, a fibra óptica foi usada para transmitir sinal telefônico. Nessa transmissão, foi usada LED's e fotodiodos de avalanche (APD). Ainda em 1977, alcançaram grandes avanços na criação de fontes luminosas.

Os estudos para melhorar a transmissão por fibra óptica, seja no material, seja na fonte ou receptor, não parava. Em 1981, na Inglaterra, foi demonstrada uma fibra monomodo que

permitia aproveitar as perdas extremamente baixas, na região de 1550nm, associadas às vantagens da dispersão zero a qual era comum à região de 1330nm. Desta forma, conseguiram a criação de sistemas de longo alcance, com grande capacidade de transmissão, usando para a transmissão por cabos submarinos.

Com toda essa evolução, em 1988, começou a funcionar o primeiro sistema com cabo óptico submarino transatlântico, com fibras monomodo, sem a distância total de 7500 km, com repetidores a cada 60 km [CASTELLS, 1988]. Atualmente, os estudos são em busca de aumentar a capacidade de transmissão, e diminuir o número de repetidores. Para isso, os trabalhos são os comprimentos de ondas. Na parte das fontes luminosas, buscam-se fontes mais potentes e com menos dispersão cromática, em relação à recepção, procura-se por receptores a níveis de detecção próximos ao limite quântico.

2. A NATUREZA DA LUZ

Na época de Isaac Newton (1642-1727), grande parte dos cientistas acreditava que a luz era composta por minúsculas partículas emitidas pelas fontes de luz. No entanto, em torno de 1665, já surgiam às primeiras evidências das propriedades ondulatórias da luz [HALLIDAY, 1991]. No começo do século XIX, essas evidências cresceram bastante, tornando convincente o conceito de que a luz era uma onda. Já em 1873, James Clerk Maxwell previu a existência das ondas eletromagnéticas e calculou a velocidade de propagação dessas ondas [COLLIN, 1966]. Juntando isso, com o trabalho de Heinrich Hertz, iniciado em 1887, viu-se que a luz podia realmente se comportar como uma onda eletromagnética. Normalmente é usado o conceito de frente de onda quando se faz referência à propagação de uma onda. Já para representar as direções da propagação da luz, fala-se raio de luz ou feixe de luz, que indica a sua trajetória [LONGHURST, 1973].

2.1 REFLEXÃO E REFRAÇÃO

Quando um raio de luz atinge uma superfície lisa que separa dois meios transparentes (ar e vidro, por exemplo), geralmente uma parte da luz é refletida e a outra parte é refratada (atravessa o material). Podemos representar essa reflexão e essa refração graficamente através de segmentos de reta, que correspondem aos os feixes de luz.

A representação das direções dos raios incidente, refletido e refratado no ponto que separa os dois meios é descrita através do ângulo que cada raio forma com a reta normal à superfície, como ilustra na Figura 2.1. Se a superfície for lisa, a reflexão ocorre somente em uma direção, e a chamamos de **reflexão especular**; caso ela seja em uma superfície áspera, os raios serão refletidos em várias direções diferentes, ocorrendo a **reflexão difusa** [HALLIDAY, 1991]. Neste trabalho sempre que for mencionada a palavra ‘reflexão’, esta será considerada especular.

Neste momento, cabe comentar sobre o índice de refração de um material, n . Sua definição é dada pela razão entre a velocidade da luz no vácuo, c , e a velocidade da luz v no material n [MARCUSE, 1972].

$$n = \frac{c}{v} \quad (\text{eq. 2.1})$$

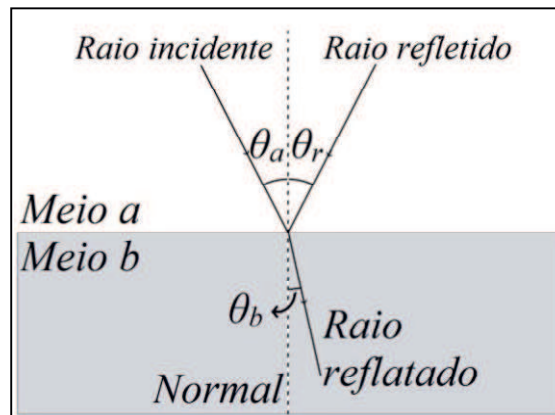


Figura 2.1 - Raios incidente, refletido e refratado no mesmo plano.

Neste caso, v nunca será maior que c , então n sempre será maior que 1, pois a luz sempre se propaga mais rápido no vácuo do que em qualquer outro material. Portanto, no vácuo $n = 1$, já que v será igual a c . Pode-se notar também que, quanto maior o índice de refração, menor será a velocidade de propagação num meio.

A partir de alguns estudos experimentais sobre as direções dos raios incidente, refletido e refratado em uma superfície lisa e transparente, foi obtido o seguinte resultado: os três raios e a reta normal à superfície estão todos sobre o mesmo plano [LONGHURST, 1973], isso pode ser visto na ¹Figura 2.1. Portanto, considera-se que:

- 1 – Os ângulos são medidos a partir da reta normal.
- 2 – O ângulo refletido (θ_r) é igual ao ângulo de incidência, (θ_a) ou seja:

$$\theta_r = \theta_a \quad (\text{eq. 2.2})$$

- 3 – Os ângulos θ_a e θ_b e os índices de refração dos dois meios se relacionam pela equação:

$$(\text{sen}\theta_a) n_a = (\text{sen}\theta_b) n_b \quad (\text{eq. 2.3})$$

A lei da refração (eq. 2.3) também é conhecida como lei de Snell, em homenagem ao cientista holandês Willebrod Snell (1591-1626).

¹Todas as figuras neste trabalho são originais do autor, exceto as referenciadas.

Pela lei da refração, podem-se notar três situações diferentes com relação ao ângulo do raio refratado, mostrados na Figura 2.2.

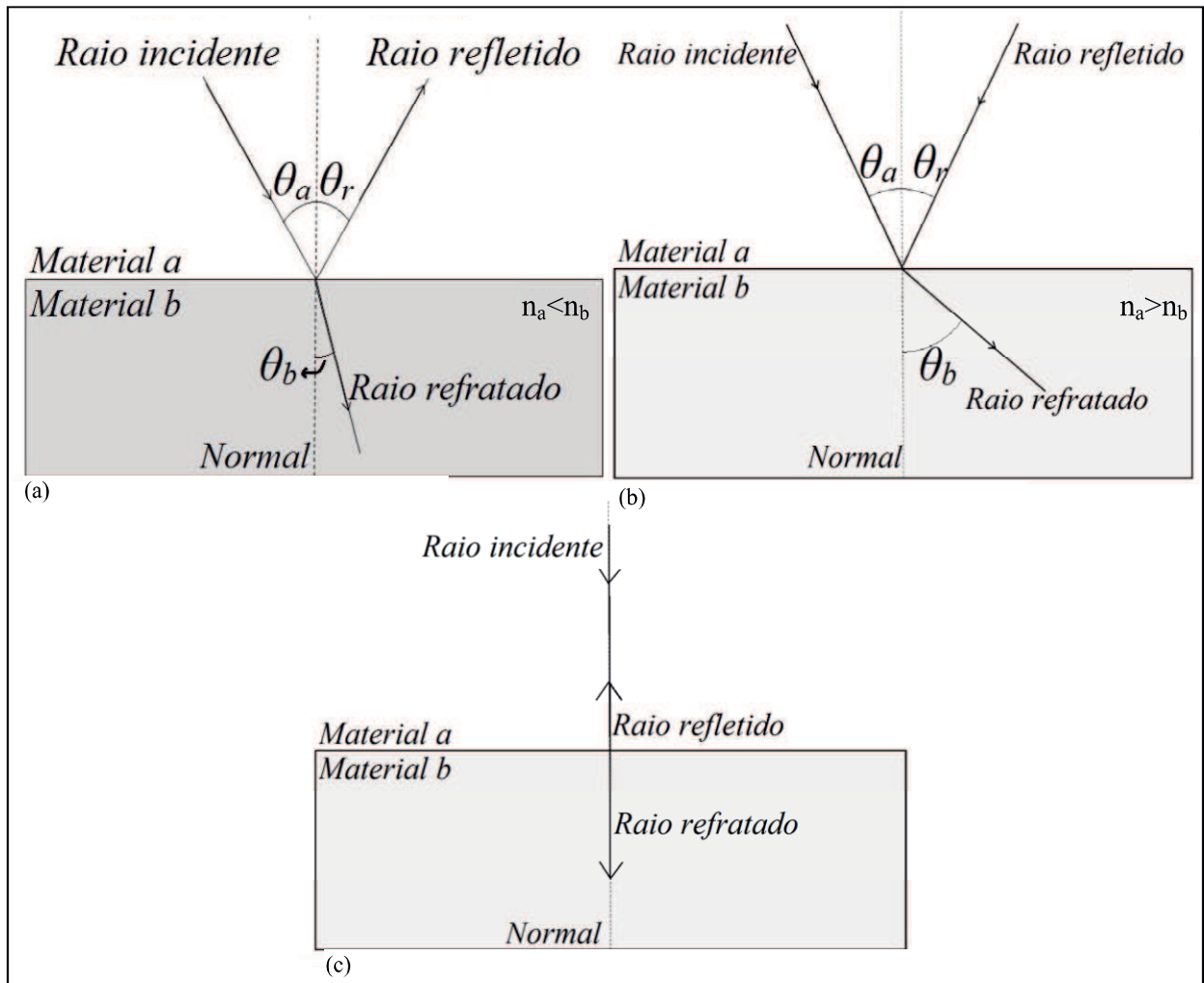


Figura 2.2 - a) Quando $n_a < n_b$, o raio refratado se aproxima da normal, b) quando $n_a > n_b$, o raio refratado se afasta da normal e c) quando o raio incidente é perpendicular à superfície, o raio refratado não sofre desvio.

A partir da equação 2.3 pode-se notar que, quando um raio passa de um meio a para um meio b , onde este tem um índice de refração maior ($n_b > n_a$) e, portanto, uma velocidade de propagação menor, o ângulo θ_b será menor que o ângulo θ_a , com isso o raio se aproximará da normal (Figura. 2.2a). Quando o meio b apresenta índice de refração menor do que o meio a ($n_b < n_a$) e, com isso, velocidade de propagação de onda maior, o raio irá se afastar da reta normal (Figura 2.2b). Já quando o raio incidente é perpendicular à superfície, ou seja, na mesma direção da normal, ele não sofre desvio (Figura. 2.2c). Percebe-se isso também pela equação 2.3 já que, nesse caso, $\theta_a = \theta_b$ e $\sin \theta_a = \sin \theta_b$.

No nosso cotidiano, pode-se perceber o efeito da refração. Ela explica, por exemplo, por que um canudo nos parece torto quando este está parcialmente submerso num copo transparente com água (Figura 2.3).



Figura 2.3 - Efeito aparente observado num canudo devido à diferença entre os índices de refração da água e do ar.

As leis da reflexão e refração são utilizadas independentemente de qual lado da interface se origina o raio de luz. Por exemplo, se na Figura 2.2a ou 2.2b, o raio incidir no lado b e refratar no lado a , eles novamente, estarão no mesmo plano. Além disso, os raios refratado e refletido são reversíveis, isto é, a trajetória que o raio refratado faz do material a para o material b é a mesma que faria se fosse de b para a .

2.2 REFLEXÃO INTERNA TOTAL

Como foi visto até agora, quando um raio de luz incide sobre uma superfície que separa dois meios diferentes, uma parte dela é refletida e outra parte é refratada. No entanto, em algumas situações, a luz pode ser completamente refletida, e com isso, nenhuma parte será refratada. A Figura 2.4 mostra o comportamento dos raios de luz de acordo com o seu ângulo de incidência, onde, o material a tem índice de refração n_a e o material b tem índice de refração n_b , com $n_a > n_b$. Então, pela lei de Snell:

$$\text{sen } \theta_b = \text{sen } \theta_a (n_a/n_b) \quad . \quad (\text{eq2.4})$$

Neste caso, $n_a/n_b > 1$, então $\text{sen } \theta_b$ será maior do que $\text{sen } \theta_a$ e com isso, o raio retratado se afastará da normal. Portanto, se θ_a continuar aumentando, haverá um momento em que $\theta_b = 90^\circ$ e $\text{sen } \theta_b = 1$. Isso pode ser visto no raio 4 da Figura 2.4.

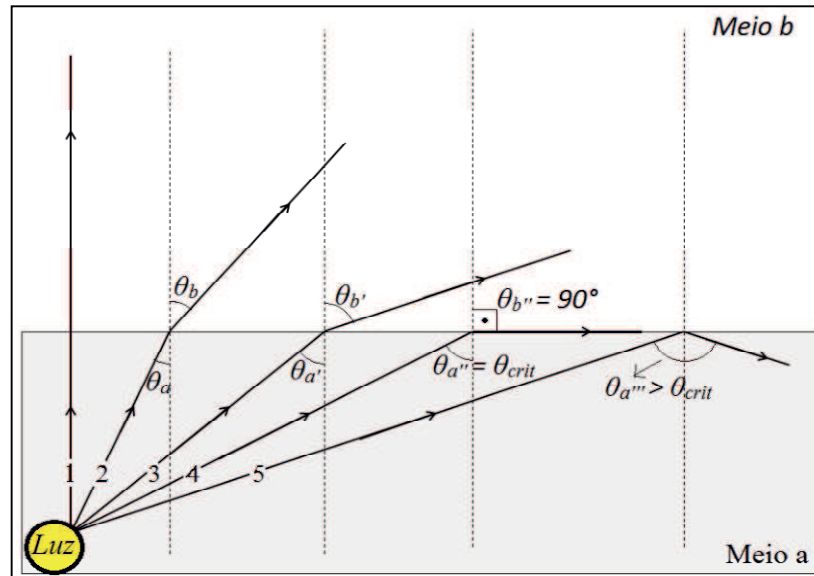


Figura 2.4 - Representação da reflexão interna total a partir de $\theta_a = \theta_{crit}$.

O ângulo de incidência a partir do qual o raio não sofre mais refração (trajetória 4 na Figura 2.4), é chamado de ângulo crítico (θ_{crit}). Então, se o ângulo de incidência for igual ou maior do que θ_{crit} , o raio de luz não passará para o meio *b* ficando, assim, no meio *a* e sendo completamente refletido na interface entre os dois meios. Essa situação é chamada de **reflexão interna total** e só acontece quando o raio de luz provém de um meio onde o índice de refração é maior do que aquele do segundo meio [MAURER, 1967].

Pode-se encontrar o ângulo crítico entre dois materiais usando a lei de Snell e fazendo $\theta_b = 90^\circ$.

$$\text{arc sen } \theta_{crit} = (n_b/n_a) \quad . \quad (\text{eq.2.5})$$

A reflexão interna total tem várias aplicações na área de óptica. Por exemplo, se usarmos dois materiais, o vidro ($n = 1,52$) e o ar ($n = 1,00$) [LONGHURST, 1973] o ângulo crítico associado a um feixe de luz incidente será:

$$\text{sen } \theta_{crit} = \frac{1}{1,52} = 0,65789 \quad \Rightarrow \quad \theta_{crit} = 41,13^\circ \quad (\text{eq. 2.6})$$

Portanto, se o ângulo de um raio incidente, dentro desse vidro, for igual ou maior que $41,13^\circ$, esse raio será totalmente refletido em seu interior. Dessa forma, se for usado um prisma com configuração de ângulos de $45^\circ - 90^\circ - 45^\circ$ (Figura 2.5), sua superfície pode ser usada para realizar uma reflexão interna total. O prisma da Figura 2.5 é chamado de prisma de Porro [HALLIDAY, 1991]. Nesse prisma, o raio refletido tem a mesma direção do raio incidente, só que sentido oposto.

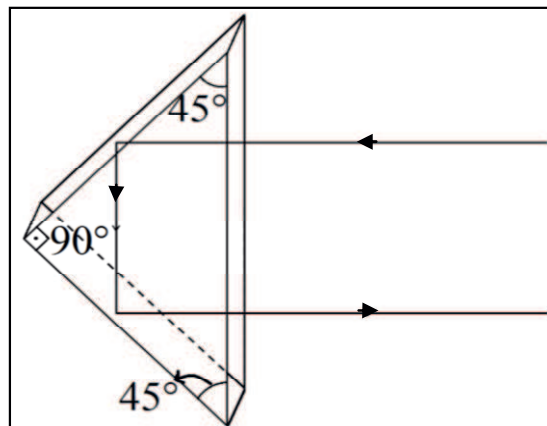


Figura 2.5 - Prisma de Porro.

Se um feixe de luz incidir no interior de um tubo transparente (Figura 2.6), e esse tubo tiver índice de refração maior do que o do meio externo, a luz sofrerá reflexão interna total. Mesmo se o tubo for curvo, a luz ainda será totalmente refletida – contanto que essa curva não seja muito grande. Um exemplo desse fenômeno é visto na fibra de vidro ou fibra óptica, [LACY,1982] que atua similarmente, e ainda com a vantagem de ser flexível.

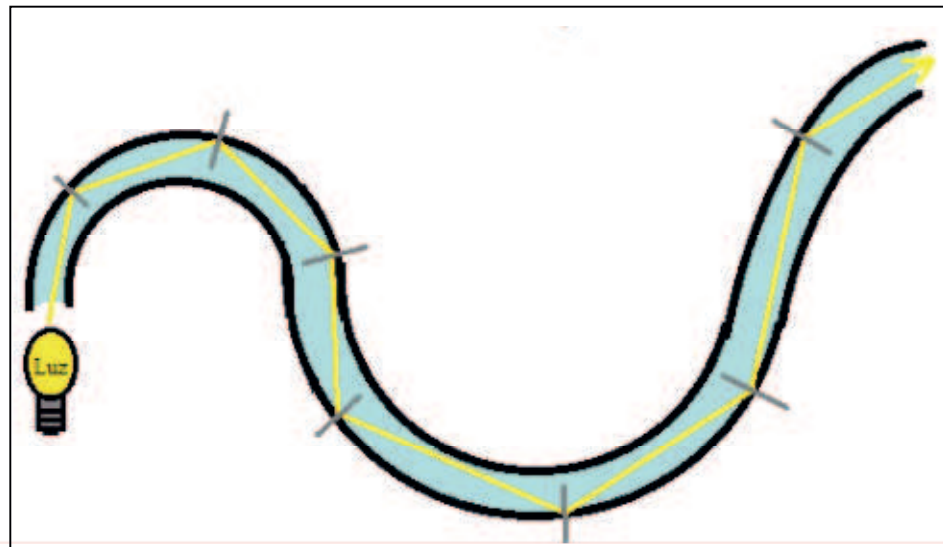


Figura 2.6 - Representação da propagação da luz (por reflexão interna total) num tubo transparente.

Instrumentos feitos com fibras ópticas são bastante utilizados hoje em dia em áreas como a medicina. Um exemplo é o endoscópio, o qual é faz uso da propagação da luz na fibra para examinar o interior do estômago durante um exame, sem que o paciente precise passar por uma cirurgia [MORETTI, 1987]. Já outro exemplo é a utilização em sistemas de comunicações. Nesse caso, a informação pode ser enviada por uma onda (luz, rádio ou outro tipo de onda), e sua velocidade estará relacionada com a frequência dessa onda [SENIOR, 1985]. No espectro eletromagnético (Figura 2.7) [SUEMATSU, 1982], vemos que a frequência da luz

visível (entre o infravermelho e o ultravioleta) é bem maior do que a frequência das ondas de rádio. Desta forma, um feixe de luz pode transmitir muito mais informações através de um cabo de fibras ópticas do que as informações oriundas das ondas de rádio. Com isso, muitas empresas brasileiras de telefonia estão usando fibras ópticas em seus sistemas de comunicação. Esse tema será abordado em detalhes no capítulo 4 deste trabalho.

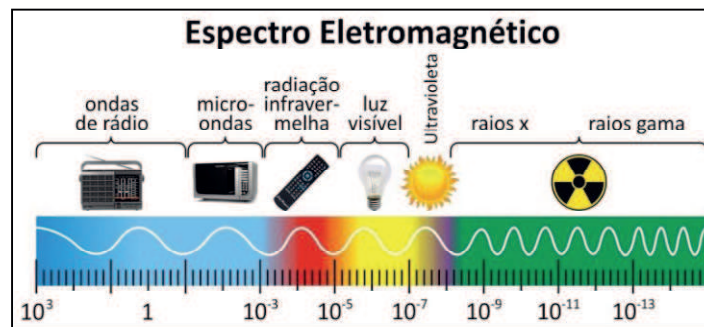


Figura 2.7 – Espectro eletromagnético [CESAR, 2015].

Outro benefício da fibra óptica é que ela não sofre nenhum tipo de interferência, pois o seu material, o vidro, é um ótimo isolante elétrico [MARCUSE, 1974]. Sendo assim, não há perigo de desvio de dados, o que aumenta a segurança na troca de informações. Esse é um dos motivos pelo qual a fibra óptica está se tornando cada vez mais importante nos sistemas de comunicações. Além da velocidade de transmissão de dados.

3. ESTRUTURA BÁSICA DAS FIBRAS ÓPTICAS

Neste capítulo, será discutido sobre a fibra óptica, componente essencial em vários sistemas de transmissão de dados. Aqui será abordado suas características e alguns materiais empregados em sua fabricação. A seguir são apresentados e comparados os vários tipos de fibras ópticas que existem no mercado. Finalmente, são apresentadas algumas vantagens do uso das fibras.

3.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DA FIBRA ÓPTICA E ABERTURA NUMÉRICA

O cabo de fibra óptica é uma tecnologia que utiliza um filamento de vidro transparente, também chamado de núcleo, onde o seu interior tem um alto grau de pureza. Seu diâmetro é tão fino quanto um fio de cabelo humano. Através desse cabo, é possível transmitir milhares de informações digitais sem perdas significativas ao longo de grandes distâncias [BASCH, 1987].

Ao redor do núcleo existem outras substâncias de menor índice de refração, que faz com que os raios sejam refletidos em seu interior (reflexão interna total), diminuindo assim as perdas ao longo da transmissão. Nos sistemas de comunicação que utilizam cabo de fibra óptica são empregados como fonte luminosas dispositivos emissores de luz (LED'S) ou lasers. Além disso, por serem feitas de material dielétrico, as fibras não sofrem nenhum tipo interferência eletromagnética, já que esses materiais não transmitem pulsos elétricos [OLSHANSKY, 1979].

A tecnologia associada à fabricação das fibras permite que dados sejam transferidos a uma taxa na ordem de Gbps (bilhões de bits por segundo) [SENIOR, 1985], no entanto, para que tenhamos o tráfego dessas informações a essa taxa de transmissão no interior da fibra óptica, são necessários equipamentos chamados de conversores de mídias, que transformam os dados em sinais luminosos.

O cabo de fibra óptica é bastante flexível e pode ser colocado dentro de diversos tipos de tubos usados para proteger a fiação elétrica, sem problemas. Não é necessário que os cabos fiquem em linha reta, mas há um limite máximo que ele pode ser curvado, e devido às suas camadas de proteção, os cabos de fibra também apresentam uma boa resistência mecânica [AINSLIE, 1982].

Em óptica, a abertura numérica AN de um sistema óptico é o número que caracteriza o intervalo de ângulos sobre os quais o sistema pode receber ou emitir luz. Acima desse ângulo, os raios não irão refletir no interior da fibra. Esse ângulo (θ) é chamado de *ângulo de aceitação*. O valor da abertura numérica pode ser determinado apenas pelos índices de refração do núcleo e da casca:

$$AN = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad \text{ou} \quad AN = \text{sen}\theta \quad (\text{eq. 3.1})$$

onde n_1 é o índice de refração do núcleo e n_2 é o índice de refração da casca.

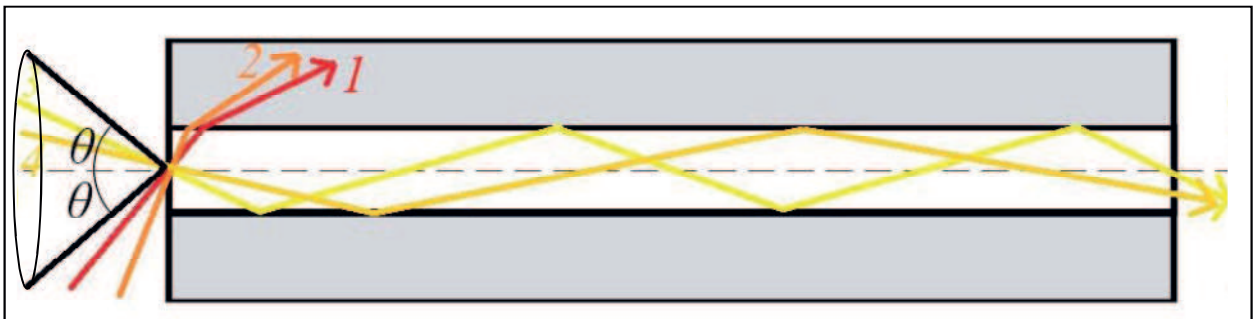


Figura 3.1 – O cone representa o intervalo de ângulos sobre os quais a fibra óptica pode receber ou emitir luz.

Na Figura 3.1 ilustra-se os raios de luz incidentes que tem ângulos maiores que θ não conseguem sofrer as reflexões necessárias para a propagação ao longo da fibra óptica. Os raios de luz incidentes 1 e 2, por exemplo, não se propagam ao longo da fibra por não estarem dentro do chamado *cone de aceitação* referente à abertura numérica. Já os raios 3 e 4 estão dentro deste cone, e são transmitidos ao longo da fibra.

3.2 TIPOS DE FIBRA

As fibras ópticas podem ser classificadas de acordo com suas características básicas de transmissão. Dependendo da capacidade dessa transmissão e de como ocorrem as conexões das fontes e dos detectores luminosos, a classificação resulta em dois modos [SENIOR, 1985]: monomodo e multimodo. Essas categorias definem a forma como a luz se propaga no interior do núcleo.

Fibra multimodo de índice degrau: este tipo de fibra foi uma das pioneiras a surgir e é o tipo mais simples. Constitui-se basicamente de um único tipo de vidro para compor o nú-

cleo da fibra, ou seja, o índice de refração será sempre constante. O núcleo pode ser feito de vários materiais (plástico, vidro, etc.) e sua dimensão varia de 50 a 400 μm (conforme ilustrado na Figura 3.2), conforme o tipo de aplicação [CHERIN, 1983]. Já a casca, cuja a função básica é garantir que a luz fique sempre contida no interior do núcleo, pode ser feita de vidro, plástico e até mesmo o próprio ar.

Essas fibras são limitadas quanto à capacidade de transmissão. Possuem atenuação (associada às perdas ópticas durante a transmissão dos dados ao longo da fibra) elevada (maior que 5 dB/km) e pequena largura de banda² (menor que 30 MHz/km) e, portanto, são utilizadas em transmissão de dados em curtas distâncias e iluminação [SENIOR, 1985].

A fabricação e a conectividade nesse tipo de fibra são bem mais simples, isso acaba economizando e facilitando a construção dos sistemas que as usam. Outra vantagem é a alta capacidade de captar energia luminosa, o que ocorre devido à relativamente alta AN desse tipo de fibra, permitindo a utilização de fontes luminosas mais baratas.

Contudo, os altos valores de AN trazem inconvenientes como, por exemplo, o fenômeno da dispersão modal (vários caminhos possíveis de propagação que a luz pode ter no núcleo da fibra), já que esse tipo de fibra permite que um elevado número de modos exista dentro da fibra. Isso acaba diminuindo consideravelmente a banda de transmissão das fibras multimodo de índice degrau [CSELT, 1981].

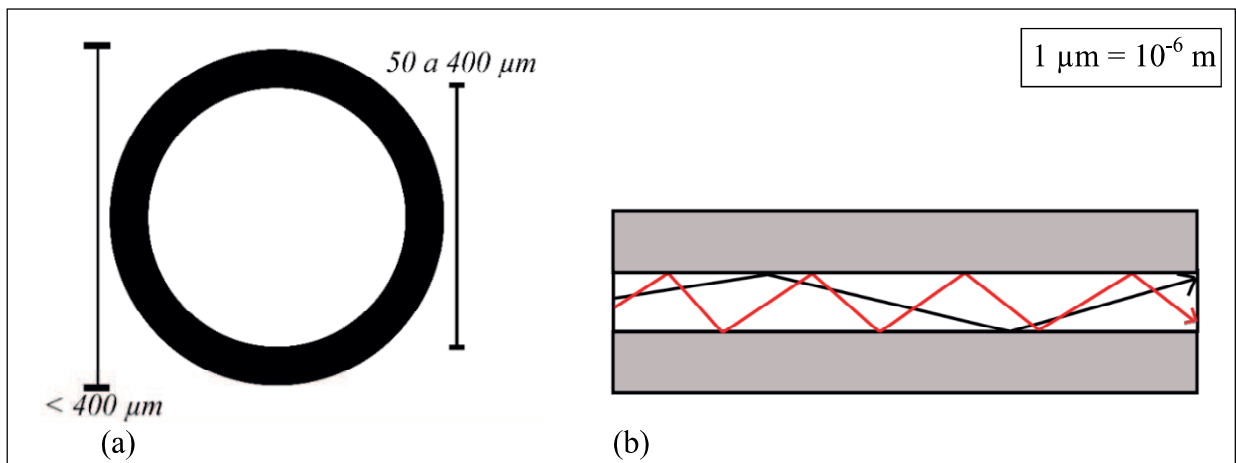


Figura 3.2 – (a) Dimensão típica da fibra multimodo de índice degrau e (b) comportamento da luz no interior da mesma de acordo com a AN.

Fibra multimodo de índice gradual: este tipo de fibra tem seu núcleo composto por vidros especiais com diferentes valores de índice de refração para, assim, diminuir as diferenças de tempos de propagação da luz no núcleo, devido às várias direções possíveis que a luz

²A largura de banda de uma fibra relaciona-se à faixa de comprimentos de onda (ou frequências) nos quais a fibra transmite sinal [OPN, 2010]. Este conceito será discutido no capítulo 4.

pode tomar no interior da fibra, isso diminui a dispersão e aumenta a largura de banda passante da fibra óptica [GLOGE, 1973].

Os materiais que geralmente são empregados na fabricação dessas fibras são sílica pura para a casca e sílica dopada para o núcleo, que têm dimensões típicas de 125 e 50 μm , respectivamente. Essas fibras apresentam baixas atenuações (3 dB/km em 850 nm) e capacidade de transmissão altíssimas. São, por esse motivo, empregadas em telecomunicações [BASCH, 1987].

Nessa fibra, o núcleo não possui índice de refração constante, ele aumenta gradativamente do eixo central até as bordas [SAIFI, 1982]. Com isso, quando os raios que se aproximam das bordas, o índice de refração vai aumentando.

Suas dimensões, ilustradas na Figura 3.3, são menores que na fibra multimodo de índice degrau e possui AN menor, logo a quantidade de modos possíveis também diminui e consequentemente aumentam a banda passante e a distância que essa banda pode atingir. A sua fabricação é mais complexa em relação à da fibra multimodo de índice degrau, mas ainda mantém uma certa facilidade de conexão [KEISER, 1983].

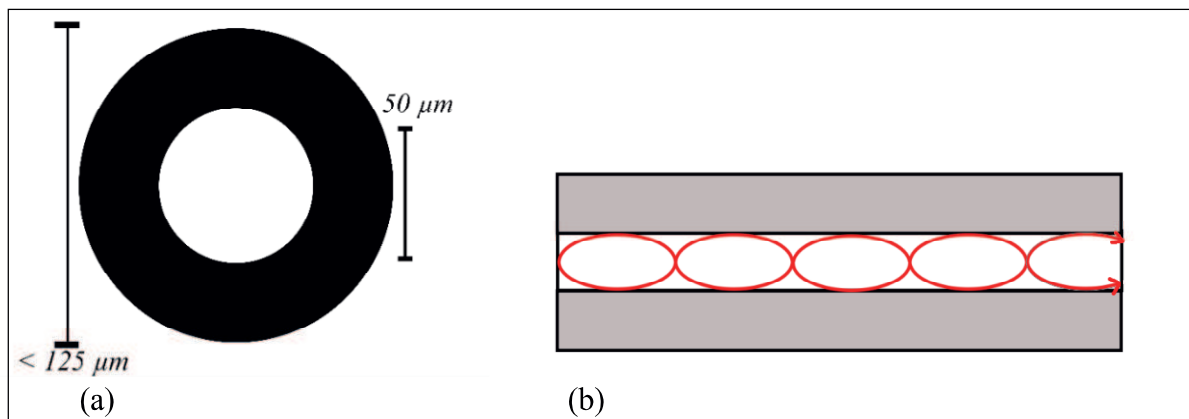


Figura 3.3 – (a) Dimensão típica da fibra multimodo de índice gradual e (b) comportamento da luz no interior da mesma

Fibra monomodo: esta fibra, ao contrário das outras duas citadas anteriormente, é construída de forma que se evitem os vários caminhos de propagação da luz dentro do núcleo, o que diminui a dispersão do raio luminoso. Para que isso ocorra, é necessário que o diâmetro do núcleo seja poucas vezes maior que o comprimento de onda da luz utilizada para a transmissão [CSELT, 1981].

As dimensões típicas são 2 a 10 μm para o núcleo e 80 a 125 μm para a casca, como ilustra a Figura 3.4. Os materiais utilizados para a sua fabricação são sílica e sílica dopada.

Fibras desse tipo são empregadas basicamente em telecomunicações, pois possuem baixa atenuação (0,7 dB/km em 1300 μm e 0,2 dB/km em 1550 μm) e grande largura de banda (10 a 100 GHz.km) [JEUNHOMME.1982].

Como a dimensão desses cabos são próximas aos comprimentos da luz incidente, a óptica geométrica não consegue explicar o que ocorre nas fibras monomodo; sendo assim, para os cálculos nesse tipo de fibra, deve-se tratar a luz como onda eletromagnética [KAO, 1982]. A casca, por sua vez, continua com o mesmo tamanho das fibras multimodo, pois ela precisa ser espessa o suficiente para suportar os campos eletromagnéticos do modo transmitido.

Por ser tão fina, sua fabricação acaba tendo algumas dificuldades, pois requer o uso de acopladores de alta qualidade que não alterem nem os índices de refração das fibras nem o comprimento de onda da luz incidente [AINSLIE, 1982] elevando, assim, o custo do sistema.

Por sua transmissão ser superior às das fibras multimodos, ela é mais utilizada em comunicações de média e longa distâncias, inclusive em comunicações intercontinentais, onde há elevada transmissão de dados [CSELT, 1981].

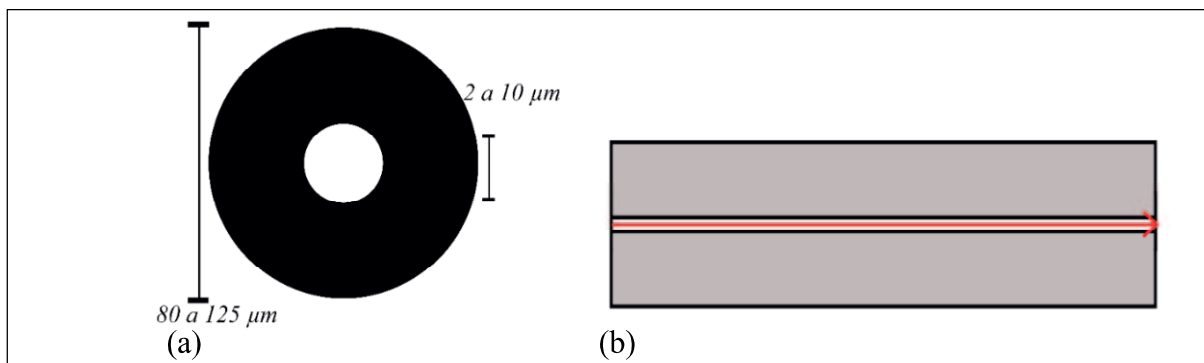


Figura 3.4 – (a) Dimensão típica da fibra monomodo e (b) comportamento da luz no interior da mesma

3.3 VANTAGENS DAS FIBRAS ÓPTICAS

A fibra óptica apresenta muitas vantagens em relação aos cabos de cobre, o que a torna uma tecnologia cada vez mais desejada por todos. A seguir veremos algumas dessas vantagens.

- atenuação baixa:

As perdas de informações nas fibras são bastante pequenas, desde atenuações da ordem de 3 a 5 dB/km na janela de 850 nm até perdas inferiores a 0,2 dB/km na janela de 1550 nm [JEUNHOMME, 1979]. Assim, é possível implementar sistemas com distâncias muito grande en-

tre os repetidores (dispositivos que amplificam o sinal transmitido ao longo da fibra devido às perdas a cada quilômetro), o que reduz bastante os custos do sistema;

- imunidade a interferências eletromagnéticas e ruídos:

As fibras ópticas não sofrem com interferências eletromagnéticas. Esse fato é vantajoso, pois as fibras são imunes a pulsos eletromagnéticos, descargas elétricas atmosféricas e a interferências causadas por outros aparelhos elétricos em geral;

- compacticidade:

As fibras possuem dimensões próximas às de um fio de cabelo humano. Para se ter uma ideia do que isso representa, um cabo metálico de cobre de 94 Kg pode ser substituído por 3,6 Km de cabos de fibra óptica [SENIOR, 1985]. Essa redução de tamanho permite aliviar o problema de espaço no subsolo de cidades e em instalações prediais;

- segurança:

As fibras ópticas não irradiam quase nada da luz que propagam. A maior parte das tentativas de captação de mensagens do interior da fibra é detectável, pois exigem que seja desviada uma quantidade significativa da potência luminosa que corre no interior da mesma [MIDWINTER, 1979]. Isso é uma característica que garante segurança à informação transportada;

- baixo custo potencial:

As fibras são fabricadas principalmente a partir de quartzo e polímeros [SENIOR, 1985]. O quartzo é um material abundante na Terra, ao contrário do cobre e dos demais metais utilizados nos outros cabos, o que torna o cabo da fibra mais barato que o de cobre. O que encarece os sistemas ópticos é o tratamento ao qual esse quartzo precisa ser submetido para se retirar impurezas das fibras e o custo dos emissores e receptores dos diferentes comprimentos de onda. Com o avanço da tecnologia, no entanto, esse custo tende a baixar [CSELT, 1981].

- sinais luminosos:

Ao contrário do que ocorre com os sinais elétricos nos fios de cobre, os sinais luminosos não interferem com os de outras fibras ópticas contidas no mesmo cabo;

- menor consumo de energia:

Como os sinais nas fibras se degradam menos, podem ser usados transmissores de menor potência em vez dos transmissores elétricos de alta tensão necessários para os fios de cobre;

- não inflamáveis:

Como não há eletricidade circulando através das fibras ópticas, elas sozinhas não geram risco de incêndio.

4. REDES DE COMUNICAÇÃO

Neste capítulo, será abordado aplicações das fibras ópticas em redes de comunicações. Para isso será discutido o conceito de janelas de transmissão, associadas ao que chamamos de bandas de comunicações ópticas, o que é fundamental para se compreender como o sinal é transportado por cabos de fibra levando-se em conta o tipo de fonte luminosa (lasers ou diodos emissores de luz - LEDs) e o tipo de rede (a depender da distância a ser percorrida pelos dados transportados). Por fim, será discutido a logística das fibras via comunicação intercontinental.

4.1 JANELAS DE TRANSMISSÃO E TIPOS DE REDE

Os sistemas de transmissão por fibras ópticas mais simples são constituídos basicamente por um cabo de fibra óptica (Figura 4.1), um transmissor óptico e um receptor óptico [GOWAR,1993], conforme visto na Figura 4.2.



Figura 4.1 – Cabo de fibra óptica simples comparado à uma agulha.

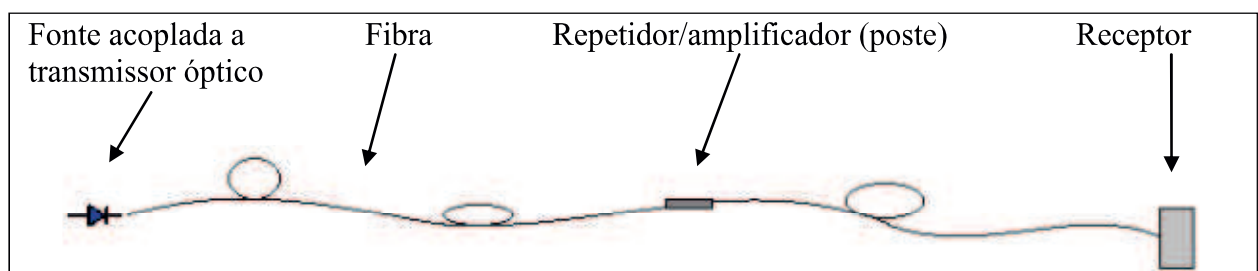


Figura 4.2 – Sistema de transmissão óptico. O sinal elétrico é convertido em luminoso e sofre perdas durante sua propagação ao longo da fibra (por isso, é necessário que postes ou repetidores sejam instalados no percurso para amplificarem o sinal durante a transmissão).

Quando a luz é transmitida através da fibra óptica, a sua intensidade diminui exponencialmente com a distância percorrida (z), comportando-se conforme a expresso através da eq. 4.1 [MIDWINTER, 1977]:

$$I(z) = I(0)e^{-(\tilde{\alpha} z)}, \quad (\text{eq. 4.1})$$

onde z , é dado em quilômetros e $\tilde{\alpha}$ é o coeficiente de atenuação, medido em decibéis por quilômetro (dB/km). As perdas por atenuação relacionam-se à razão entre o sinal transmitido e o ruído. Se este último for alto a fibra pode se comportar de modo não-linear e a transmissão de dados ficar comprometida. Por isso são usados repetidores ao longo da propagação para amplificar o sinal transmitido.

O transmissor é um fotoemissor que transforma os sinais elétricos em pulsos de luz através da conversão de sinais digitais usando o código binário (0 para ausência de luz e 1 para presença de luz). Existem dois tipos básicos de fotoemissores: o LED (light emitting diode ou diodo emissor de luz) e o laser.

Os LEDs são mais simples e baratos, porém possuem emissões incoerentes por terem seu espectro mais largo. Sua eficiência para conectar a luz à fibra é menor e ainda têm limitações na velocidade de modulação. Já os lasers possuem uma emissão coerente, já que o espectro é bem estreito e o feixe polarizado, e sua potência é maior; no entanto, seu custo é mais elevado que no LED [CHERIN,1983].

O receptor óptico é um fotodetector que recebe a luz transmitida pela fibra e a converte de volta em sinal elétrico. A eficiência de um fotodetector depende de sua capacidade de amplificar o sinal, pois a potência do sinal recebido pode chegar a nanowatts (10^{-9} Watts) [CSELT, 1980].

Como foi visto no capítulo 2, a luz pode se comportar como onda, então, ela tem comprimentos de onda associados. Quando analisado os sinais de transmissão, deve-se considerar tanto esses comprimentos quanto as propriedades das fibras.

O comprimento de onda da luz tem uma relação com a frequência e a velocidade da luz, e, de acordo com a equação [CARUSO, 2006], onde esse comprimento pode ser definido também como a velocidade da onda dividida pela frequência da onda.

$$\lambda = c/f \quad \text{ou} \quad f = c/\lambda, \quad (\text{eq. 4.2})$$

onde λ é comprimento de onda, f a frequência desta e c é a velocidade da luz.

Um feixe luminoso também pode ser comparado a pacotes discretos de energia, constituído por partículas denominadas fótons. A frequência da onda é proporcional à magnitude da energia da partícula. Como os fótons são emitidos e absorvidos por partículas, eles atuam como transportadores de energia. A energia de um fóton é calculada pela equação de Planck-Einstein [EISBERG, 1994]:

$$E = hf \quad (\text{eq. 4.3})$$

onde E é a energia, h é a constante de Planck, e f é a frequência.

As fibras não transmitem sinais de uma forma eficaz em todos os comprimentos de onda, somente em alguns intervalos, também conhecidos como janelas de transmissão ou bandas, como ilustrado na Figura 4.3.

Atualmente, o laser operando na região do infravermelho (IR) é o mais utilizado como fonte luminosa no transmissor óptico [MIYASHITA, 1982] associado a redes de comunicação ultrarrápida e computadores (devido à duração de seu pulso ser da ordem de fentosegundos). A cada intervalo de comprimentos de onda nesta região está relacionada uma banda ou janela [LEMOFF, 2002]:

BANDA C ou **CONVECCIONAL**: janela de transmissão que abrange comprimentos de onda entre 1530 nm e 1565 nm. Fibras “single-mode” funcionam bem nesta banda, cujo centro está em $\lambda = 1550$ nm (onde há menor perda de sinal).

BANDA L ou **LARGA**: fibras operando na janela entre 1565 nm e 1625 nm, sendo usados para “long-haul telecom” (telecomunicações de longa distância).

BANDA S ou **CURTA**: o centro desta janela está em $\lambda = 1490$ nm (onde há menor atenuação do sinal transmitido).

BANDA O ou **ORIGINAL**: o centro desta banda é em $\lambda = 1310$ nm.

BANDA SEM NOME: associados às fibras que transmitem em $\lambda = 850$ nm (IR próximo).

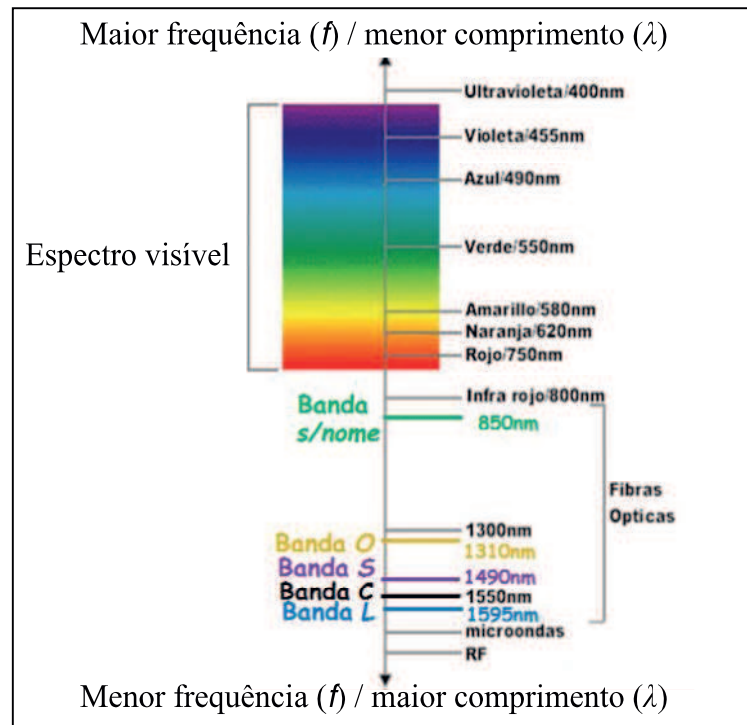


Figura 4.3 – Comprimentos de onda associados às janelas ou bandas de transmissão óptica [OLIVEIRA, 2015].

Na comunicação por fibra óptica, existem algumas técnicas que beneficiam as transmissões; uma delas é a multiplexação, que é a transmissão de vários sinais usando uma única linha de comunicação ou canal economizando, assim, fibras e equipamentos de transmissão. Um tipo de multiplexação é o DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing - Multiplexação Densa por Divisão de Comprimento de Onda).

Os comprimentos de onda utilizados pelos sistemas DWDM estão, aproximadamente, entre 1500 nm e 1600 nm (correspondente às transmissões via bandas C e L) possuindo, assim, alta capacidade de transmissão por canal (atualmente 40 Gb/s, podendo chegar a 1 Tb/s nas transmissões de dados por um único cabo de fibra) [JENSEN, 2003]. O sistema de multiplexação DWDM evita a substituição de cabos das fibras já instaladas.

Existem vários tipos de rede que utilizam a fibra óptica; por exemplo a TV a cabo, que transmite sinais de vídeo através da fibra, sendo que essa tem mais vantagens em relação aos cabos coaxiais (uma destas vantagens é a redução dos repetidores) [KAO, 1982].

Uma outra aplicação da fibra é em sensores. Neste tipo de aplicação, a fibra dependerá de estímulos externos [GIALLORENZI, 1986].

As fibras também podem ser empregadas para transportar dados em distâncias bem pequenas com a utilização de lasers contínuos de baixa potência média ($\bar{P}=1\text{mW}$), como os VCSELs (Vertical Cavity Surface-Emitting Lasers ou lasers de cavidade vertical curta) ilustrado através da Figura 4.4. Nestes dispositivos a luz é emitida em uma direção perpendicular

à superfície de um chip a ser utilizado em detecção de precisão, mouses de computador (mouse óptico) e impressoras a laser [KNER, 2002].

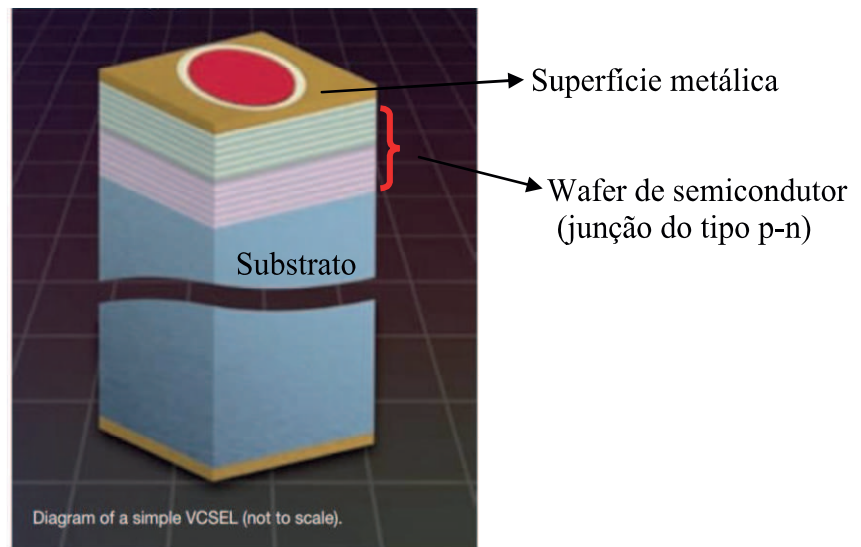


Figura 4.4 - Estrutura VCSEL acoplada a um wafer semicondutor [KITTEL, 2013] num mouse óptico [DAUKANTAS, 2010].

Cada tipo de rede requer condições próprias para lasers e esquemas de modulação, que são resumidos no Quadro 1.

Tipos de rede	Longa distância	Metro	Acesso	Interconectado
Distância	> 100Km	10Km	Limitado a 20 km pelo padrão da União Internacional das Telecomunicações (ITU); muitas vezes < 10 km	<100m
Tipos de laser	Principalmente DFB	DFB, VCSEL	Download: DFB Upload: DFB ou Fabry-Pérot	VCSEL
Comprimento de onda	1,550 nm (C-banda); 1,565 à 1,625 nm (L-banda)	1,310 nm; 1,550 nm	Download: 1,490 nm e/ou 1,550 nm Upload: 1,310 nm	850 nm; 1,310 nm
Esquema de modulação	Direta ou externa	Direta	Direta	Direta
Velocidade	10 Gbps	10 Gbps	Download: ≤ 2.5 Gbps Upload: ≤ 1.24 Gbps	10GigE; 40GigE e 100GigE padrões que esperavam no meio de 2010
Esquema de multiplexação	WDM, DWDM ou inferior WDM	Inferior a WDM ou DWDM	WDM	Governado pelos protocolos Fibre Channel e Ethernet

Quadro 1 – Condições de cada tipo de rede [DAUKANTAS, 2010].

Para longas distâncias, os lasers precisam de potência, mesmo com a presença dos repetidores. Lasers DFB (Distributed FeedBack) são as fontes luminosas mais usadas em telecomunicação, funcionando melhor em fibras monomodo, já que as distancias maiores precisam diminuir a atenuação. Quando a distância é grande, é usado o WDM, que aumentará a capacidade de transmissão de dados.

Nas redes metro podem ser utilizados tanto os lasers DFB quanto os VCSELs, isso dependendo da distância. Os VCSELs são mais baratos e não exigem alta potência [KNER, 2002]. Já as redes de acesso começaram a ganhar mais interesse por causa do crescente aumento da FTTH (Fiber-To-the-Home ou fibra para casa) e da alta definição de vídeos. A sua principal diferença é o fato do feixe de luz partir da central da operadora e ir diretamente até os usuários [OPN, 2010].

4.2 REDES TELEFÔNICAS E CABOS SUBMARINOS

Uma das primeiras aplicações das fibras ópticas em sistemas de comunicação foi nos sistemas de telefonia, e até hoje são bastante utilizadas nestes. Comparada aos cabos convencionais (de cobre e aço), a eficiência na transmissão de dados telefônicos a distâncias é muito superior já que possuem uma maior largura de banda, de modo que se economizam custos em relação aos outros cabos utilizados para a mesma finalidade [LILLY, 1982].

As fibras ópticas também fazem a ligação entre centrais telefônicas próximas umas das outras, pois as centrais aproveitam a grande banda passante (banda larga) das fibras para evitar congestionamentos devido à demanda de usuários que vem crescendo a cada dia [KIMURA, 1986].

Os cabos de fibra óptica atravessam oceanos ligando os continentes através dos cabos submarinos, o que é ilustrado na Figura 4.5. Eles são parte constituinte da rede internacional de telecomunicações (Figura 4.6), cobrindo praticamente todos os continentes do globo. O primeiro cabo de fibra óptica intercontinental foi instalado em 1988, sendo associado ao sistema TAT-8, e tinha capacidade para realizar 40.000 conversas telefônicas ao mesmo tempo, usando tecnologia digital. A partir de então, a capacidade dos cabos aumentou [SENIOR, 1985]. Esses cabos podem ser utilizados para diferentes tarefas, como transmissão de dados de televisão a cabo, além da telefonia.

Com o crescimento do tráfego intercontinental, provavelmente será necessário usar um sistema superior ao TAT-8, que tenha uma maior capacidade de transmissão e consiga atender a todos os usuários. Junto com essa evolução, também será possível aumentar as distâncias entre os repetidores diminuindo, assim, os custos, de instalação e manutenção [CASTELLS, 1988]. A Figura 4.6 mostra um repetidor sendo preparado para instalação.

O cabo submarino mais longo (o SEA-ME-WE 3) tem 39 mil quilômetros e liga as cidades de Norden (Alemanha) e Keoji (Coréia do Sul). O sistema conecta 33 países diferentes. Temos também o cabo SEA-ME-WE 4, que foi concluído em 2005 e cobre aproximadamente

20 mil quilômetros, ligando a França através do Oriente Médio a Singapura [COFFEY, 2014]. Até 2018, estima-se que cabos ópticos submarinos cubram 2 milhões de quilômetro no mundo.

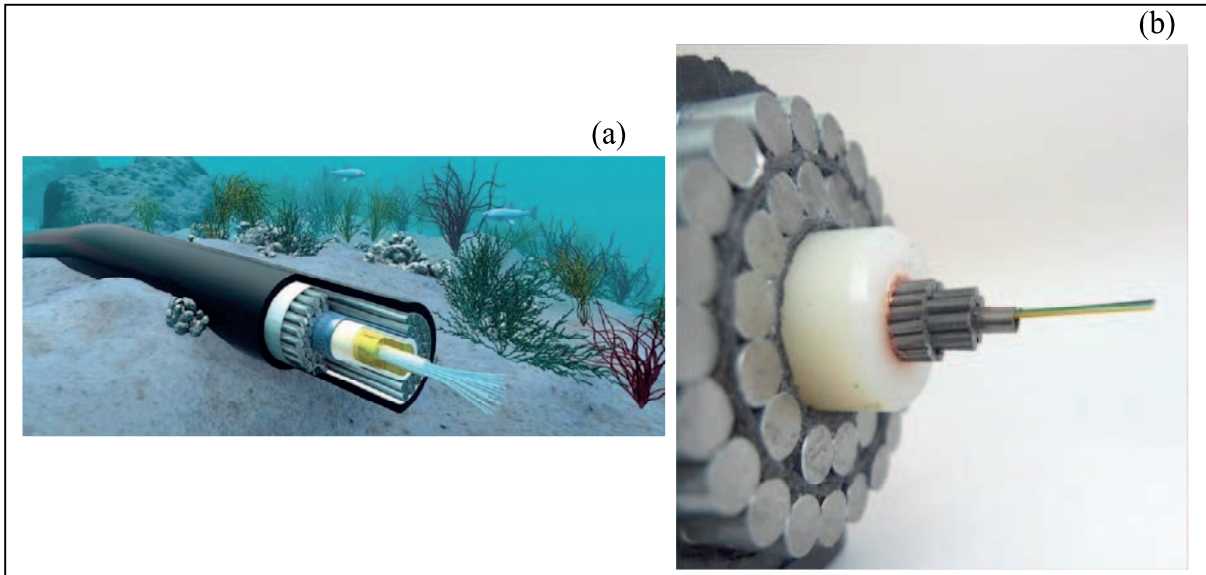


Figura 4.5 – (a) Ilustração de cabo óptico submarino no fundo do mar [MONTEZ, 2015] e (b) cabo óptico submarino real [MCCARTHY, 2011].

Além de serem muito compridos, os cabos submarinos ainda tem camadas que os protegem de qualquer acidente que possa acontecer no mar. Um cabo óptico submarino tem, em média, um diâmetro de 17 mm em águas mais profundas e de 70 mm em águas mais rasas, sendo nestas fortemente blindados. Quanto mais próximo da superfície, mas revestidos são os cabos (Figura 4.7).

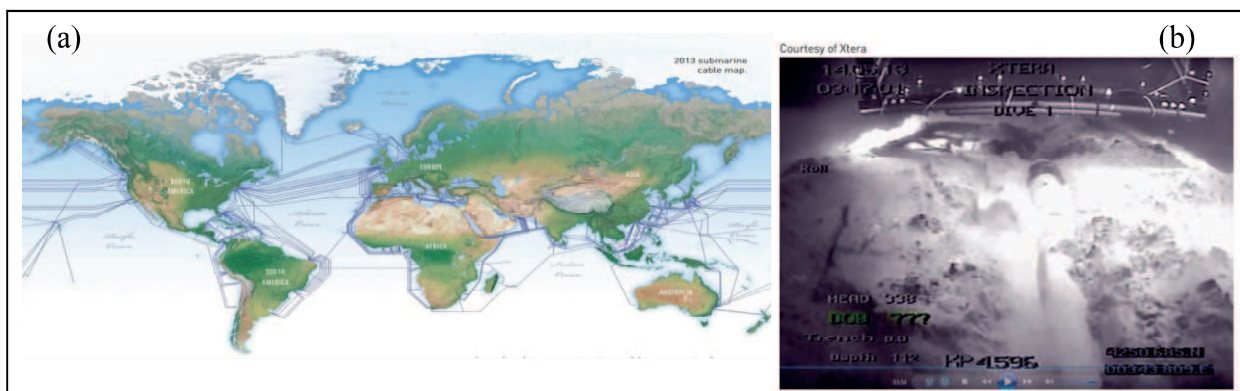


Figura 4.6 – (a) Rede internacional de comunicação óptica submarina e (b) repetidor pronto para instalação [OSA, 2014].

Existem projetos (como o do cabo (SEA-ME-WE 3) que visam aumentar a capacidade de transmissão das fibras no oceano usando a tecnologia DWDM para transmitir dados via banda L (telefone, internet, etc); essa proposta consiste em seis pares de fibras com velocidade inicial de transporte de 28 Tb/s (cada par formado por uma fibra propagando sinal numa direção e outra em outra direção). Com isso, por exemplo, pode-se transmitir até 30 milhões de vídeos em HD [CARTER, 2009].

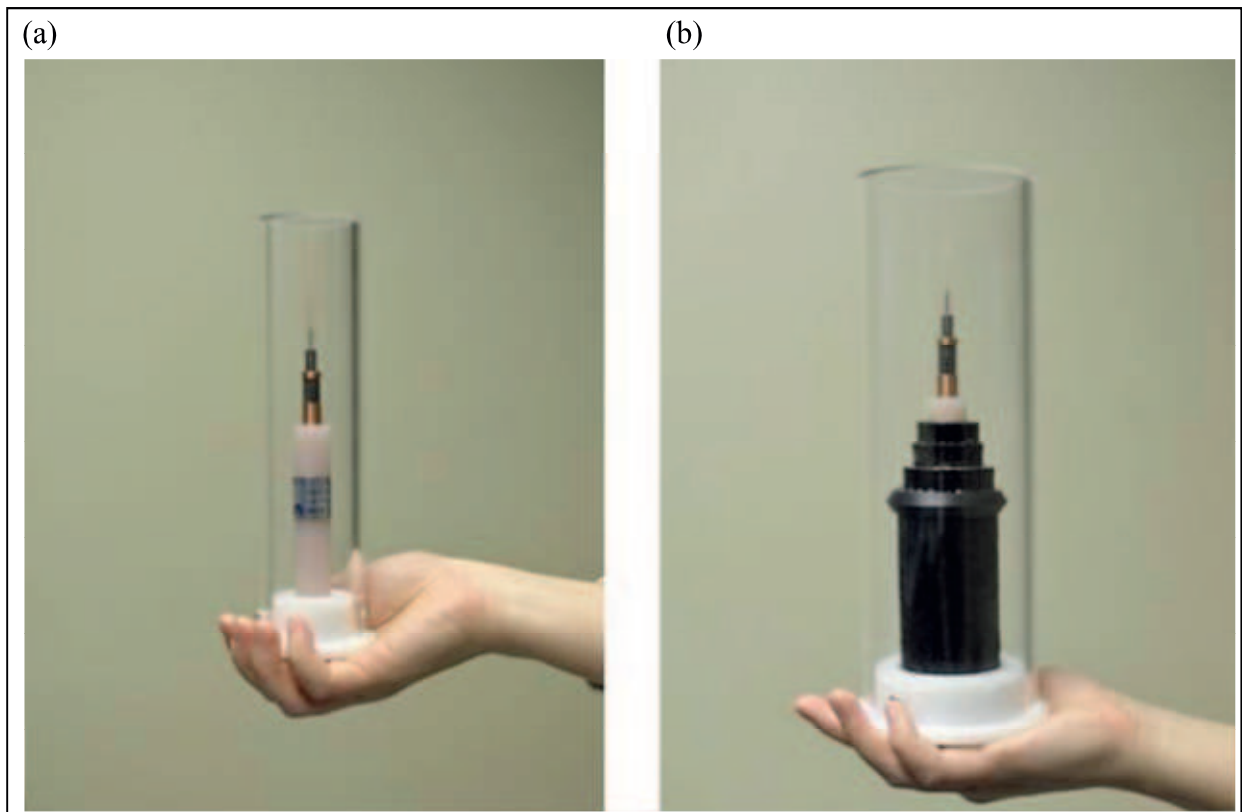


Figura 4.7 – (a) Cabo submarino usado em águas profundas e (b) com proteção reforçada, utilizado em águas mais rasas [ORENSTEIN, 2017].

CONSIDERAÇÕES FINAIS

- Com o avanço da tecnologia na área de comunicações, a fibra óptica surge como elemento chave que contribuiu para aumentar a velocidade de transmissão de dados;
- As fibras ópticas têm várias aplicações, se tornando vantajosas para os mais diversos usos;
- Elas são muito mais seguras, flexíveis e eficientes que os cabos de cobre, garantindo a proteção das informações e do sistema;
- A eficiência e atenuação de sinal na propagação de dados via cabos de fibra óptica dependem da fonte utilizada – LEDs ou lasers (e conseqüentemente do comprimento de onda emitido por tal fonte), da banda óptica ou janela de transmissão da fibra, do tipo de fibra, da distância percorrida pelo sinal e da finalidade de aplicação;
- As redes de comunicação intercontinentais utilizam cabos de fibra óptica submarinos para a transmissão de informações em todo o planeta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [AINSLIE, 1982] AINSLIE, B.J. e outros – *The Design and Fabrication of Monomode Optical Fiber*, IEEE j. Quantum Electron., v. QE – 18 (1982).
- [BASCH, 1987] BASCH, E.D. ed. – *Optical-Fiber Transmission*. SAMS (1987).
- [BURRUS, 1971] BURRUS, C. A. e MILLER, B.I. – *Small Area, Double Heterostructure Aluminium Gallium Arsenide Electroluminescent Diode Sources for Optical Fibre Transmission Lines*, Opt. Commun., v.4, n°12, pp. 307-309 (1971).
- [CARTER, 2009] R. L. CARTER et al. *Submarine cables and the oceans: Connecting the world*. UNEP-WCMC Biodiversity Series No. 31. ICPC/UNEP/UNEP-WCMC (2009).
- [CARUSO, 2006] CARUSO e OGURI. - *Física Moderna*. Campus (2006).
- [CASTELLS, 1988] CASTELLS, G. e MOURET, J.C. – *TAT-8: L'Optique défie l'Océan*, France Telecom, n° 67, 1988, pp. 35-44 (1988).
- [CESAR, 2015] CESAR, M. *Espectro eletromagnético*
<<http://marcoscesarja.blogspot.com.br/2015/11/espectro-eletromagnetico-com-otima.html>>
(Acesso em 28/09/2017).
- [CHERIN, 1983] CHERIN, A. H. – *An introduction to Optical Fibers*, McGraw-Hill (1983).
- [COFFEY, 2014] V. COFFEY, - *Sea Change: The Challenges Facing Submarine Optical Communications*, Optics & Photonics News 25(3), 26-33 (2014).
- [COLLIN, 1966] COLLIN, R.E. – *Fundamentals for Microwave Engineering*. N. York, McGraw-Hill (1966).
- [CSELTC, 1981] CSELTC – *Optical Fiber Communication*. McGraw-Hill (1981).
- [DAUKANTAS, 2010] P. DAUKANTAS, - *Lasers in Communications*, Optics & Photonics News 21(3), 28-33 (2010).
- [EISBERG, 1994] EISBERG, R. e RESNICK, R. - *Física Quântica*. 8a Edição. Rio de Janeiro-RJ. Campus (1994).
- [GIALLORENZI, 1986] GIALLORENZI, T.G. e outros – *Optical-fiber sensors challenge the competition*, IEEE Spectrum, Set., 1986, pp. 44-49
- [GLOGE, 1973] GLOGE, D. e MARCATILI, E. – *Multimode theory of graded core fibers*, Bell Syst. Tech. J., v. 52 (1973).
- [HALLIDAY, 1991] HALLIDAY, D. RESNICK e R. WALKER, J. - *Fundamentos de Física 4: Óptica e Física Moderna*, LTC (1991).

- [HARTMAN, 1973] HARTMAN, R.L. e outros – *Continuous Operation of Ga_xAl_{1-x}As Double Heterostructure Lasers with 30°C Half-Lives Exceeding 1000 h*, Appl. Phys. Lett., v. 23, pp. 181-183(1973).
- [HAYASHY, 1970] I. HAYASHY et al – *Junction Lasers which Operate Continuous at room Temperature*. Appl. Phys. Lett., v. 17, n°3, pp. 109-111 (1970).
- [HONDROS, 1910] HONDROS, D. e DEBYE, P. - *Elektromagnetische Wellen na Dielektrischen Drahter*, Ann, Physik, v.32, pp. 465-470 (1910).
- [JENSEN, 2003] T. JENSEN et al. - *Testing DWDM Components for Loss and Dispersion*, Opt. Photon. News 14(7), 36 (2003).
- [JEUNHOMME, 1982] JEUNHOMME, L.B. – *Single-mode Fiber Optics: Principles and Applications*. N, York, Marcel Dekker (1982).
- [JEUNHOMME, 1979] JEUNHOMME, J.L. – *Dispersion minimization in single mode fibers between 1.3 and 1.7µm*, Electron. Lett., v.15 (1979).
- [KAO, 1996] KAO, K.C. e HOCKHAM, G.A. – *Dielectric-Fibre Surface Waveguides for Optical Frequencies*, Proc. IEE, V.133, pp. 1151-1158 (1996).
- [KAO, 1982] KAO, C.K. – *Optical Fiber Systems: Technology, Design and Applications*. McGraw-Hill (1982).
- [KAWAKAMI, 1968] KAWAKAMI, S. e NISHIZAWA, J. – *An Optical Waveguide with the Optimum Distribution of the Refractive Index with Reference to Waveform Distortion*, IEEE Trans. Microwave Theory Tech, v. 16, n° 10, pp 814-818 (1968).
- [KEISER, 1983] KEISER, G. – *Optical Fiber Communications*. McGraw-Hill (1983).
- [KITTEL, 2013] KITTEL, C.; - *Introdução à Física do Estado Sólido 8ª Ed.*, LTC, Rio de Janeiro (2013).
- [KNER, 2002] P. KNER et al. - *VCSEs Go the Distance*, Opt. Photon. News 13(3), 44 (2002)
- [KIMURA, 1986] KAMURA, T. - *Fiber Optic Transmission Systems – Status and Trends in Japan*, IEEE JSAC, v. SAC-4, n°4, pp. 498-505 (1986).
- [LACY, 1982] LACY, E.A. - *Fiber Optics*. Prentice-Hall (1982).
- [LEMOFF, 2002] B.E. LEMOFF. - *Coarse WDM Transmitters*, Opt. Photon. News 13(3), S-8 (2002)
- [LILLY, 1982] LILLY, C.J. - *The application of optical fibers in the trunk networks*, ITU Telecommunications Journal, v. 49-II, p. 109 (1982).
- [LONGHURST, 1973] LONGHURST, R.S. – *Geometrical and Physical Optics*, 3ª ed., Longman (1973).

[MARCUSE, 1972] MARCUSE, D. – *Light Transmission Optics*, Van Nostrand Reinhold N. York, Co. (1972).

[MARCUSE, 1974] MARCUSE, D. – *Theory of Dielectric Optical Waveguides*. N. York, Academic Press (1974).

[MAURER, 1967] MAURER, S.J. e FELSEN, L.B. – *Ray-optical techniques for guided waves*, Proc. IEEE, v. 55 (1967).

[MCCARTHY, 2011] MCCARTHY, T.J. - *INCIDENT REPORT: HUDSON CANYON* <<https://fopnews.wordpress.com/2011/03/24/incident-report-hudson-canyon-geologic-city-report-10/>> (Acesso em 15/10/2017)

[MELCHIOR, 1996] MELCHIOR, H. e LYNCH, W.T. - *Signal and Noise Response of High Speed Germanium Avalanche Photodiodes*, IEEE Trans. Electron. Device, v. ED-13, pp. 829-838 (1996).

[MIDWINTER, 1979] MIDWINTER, J. – *Optical Fibers for Transmission*. N. York, John Wiley (1979).

[MIYASHITA, 1982] MIYASHITA, T e MANABE, T. – *Infrared optical fibers*, IEEE J. Quantum Electron., v. QE-18 (1982).

[MONTEZ, 2015] MONTEZ, J. - *Brasil constrói cabo submarino para ligar internet à Europa* <<http://www.techenet.com/2015/09/brasil-constroi-cabo-submarino-para-ligar-internet-a-europa/0>> (Acesso em 17/10/2017).

[MORETTI, 1987] MORETTI, M. – *Fiberoptic sensores evolve into medical products*, Laser Focus World (1987).

[OKOSHI, 1982] OKOSHI, T. - *Optical Fibers*. Academic Press (1982).

[OLIVEIRA, 2015] T.R. OLIVEIRA, *Comunicação à Velocidade da Luz*, II ENECT - UEPB (2015).

[OLSHANSKY, 1979] OLSHANSKY, R, - *Propagation in glass optical waveguides*, v. 51, nº 2 (1979).

[OPN, 2010] *Forty Years of Optical Manipulation*, - Optics & Photonics News 21(3), 20-26 (2010).

[PAYNE, 1975] PAYNE, D.N. e GAMBLING, W.A. - *Zero Material Dispersion in Optical Fibers*, - Electron. Lett. V. 11, nº8, 1975, pp. 176-178 (1975).

[PERSONICK, 1973] PERSONICK, S.D. - *Receiver Design for Digital Fiber Optic Communication Systems Part I and II*, Bell Syst. Tech. J., v. 52, Jul-Ago., pp. 843-886 (1973).

[SAIFI, 1982] SAIFI, M.A. e outros - *Triangular – Profile Single-Mode Fiber*, Opt. Leit., v.7 (1982).

[SENIOR, 1985] SENIOR, J. – *Optical Fiber Communications: Principles and Practice*. Londres, Prentice-Hall (1985).

[SHAWLOW, 1958] SHAWLOW, A.L. e TOWNES, C.H. - *Infrared and Optical Masers*, Phys. Rev., v. 12, Dez., 1958, pp. 1940-1948 (1958).

[SUEMATSU, 1982] SUEMATSU, Y e IGA, K. - *Introduction to Optical Fiber Communications*, John Wiley & Sons (1982).

